This is a digital copy of a book that was preserved for generations on library shelves before it was carefully scanned by Google as part of a project to make the world's books discoverable online.

It has survived long enough for the copyright to expire and the book to enter the public domain. A public domain book is one that was never subject to copyright or whose legal copyright term has expired. Whether a book is in the public domain may vary country to country. Public domain books are our gateways to the past, representing a wealth of history, culture and knowledge that's often difficult to discover.

Marks, notations and other marginalia present in the original volume will appear in this file - a reminder of this book's long journey from the publisher to a library and finally to you.

Usage guidelines

Google is proud to partner with libraries to digitize public domain materials and make them widely accessible. Public domain books belong to the public and we are merely their custodians. Nevertheless, this work is expensive, so in order to keep providing this resource, we have taken steps to prevent abuse by commercial parties, including placing technical restrictions on automated querying.

We also ask that you:

+ *Make non-commercial use of the files* We designed Google Book Search for use by individuals, and we request that you use these files for personal, non-commercial purposes.

+ *Refrain from automated querying* Do not send automated queries of any sort to Google's system: If you are conducting research on machine translation, optical character recognition or other areas where access to a large amount of text is helpful, please contact us. We encourage the use of public domain materials for these purposes and may be able to help.

+ *Maintain attribution* The Google "watermark" you see on each file is essential for informing people about this project and helping them find additional materials through Google Book Search. Please do not remove it.

+ *Keep it legal* Whatever your use, remember that you are responsible for ensuring that what you are doing is legal. Do not assume that just because we believe a book is in the public domain for users in the United States, that the work is also in the public domain for users in other countries. Whether a book is still in copyright varies from country to country, and we can't offer guidance on whether any specific use of any specific book is allowed. Please do not assume that a book's appearance in Google Book Search means it can be used in any manner anywhere in the world. Copyright infringement liability can be quite severe.

About Google Book Search

Google's mission is to organize the world's information and to make it universally accessible and useful. Google Book Search helps readers discover the world's books while helping authors and publishers reach new audiences. You can search through the full text of this book on the web at `http://books.google.com/`

UC-NRLF
$B 3 612

BERKELEY
LIBRARY
UNIVERSITY OF
CALIFORNIA

EARTH
SCIENCES
LIBRARY

LIBRARY
OF THE
UNIVERSITY OF CALIFORNIA.

Class

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Temperatur und Zustand des Erdinnern.

Eine Zusammenstellung und kritische Beleuchtung aller Hypothesen.

Von

Hermann Thiene
Assistent am mineralog. Institut der Universität Jena.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Verlag von Gustav Fischer in Jena.
1907.

Digitized by Google

QE509
T5
EARTH
SCIENCES
LIBRARY

GENERAL

Alle Rechte vorbehalten.

Digitized by Google

Meinen lieben Eltern

in Dankbarkeit gewidmet.

16839

Digitized by Google

Digitized by Google

Vorwort.

Bei der überaus großen Fülle von Arbeiten über die Temperatur und den Zustand des Erdinnern war es ein Bedürfnis, die Literatur einmal zu sammeln und nach kritischen Gesichtspunkten zu sichten. Dementsprechend lautete das von der philosophischen Fakultät der Universität Jena gestellte Thema einer Preisarbeit. Der vorliegenden Arbeit wurde der Preis zuerkannt.

Wenn sie nun vielleicht auch nicht den Anspruch auf gänzliche Vollständigkeit machen kann, so werde ich doch wohl nichts Wesentliches übersehen haben. Die Ursache der so vielen sich widersprechenden Ansichten über das in Rede stehende Problem erblicke ich in dem Umstande, daß die Mehrzahl der vorhandenen Hypothesen vom einseitigen geologischen, mathematischen oder physikalischen Standpunkte aus aufgestellt worden sind. Ich meinerseits habe versucht, sie aus diesen drei Gesichtspunkten gleichzeitig zu betrachten und glaube nun festgestellt zu haben, welche Hypothesen überhaupt nur diskutabel sind, und nach welchen Richtungen wir noch hoffen dürfen, in eventuell experimenteller Weise die wahrscheinlichste Hypothese zu begründen.

Es sei mir auch erlaubt, meinem verehrten Lehrer, Herrn Geheimrat Prof. Dr. Linck, für die Unterstützung bei der vorliegenden Arbeit meinen herzlichsten Dank auszusprechen.

Jena, Mineralogisch-geologisches Institut,
März 1907.

H. Thiene.

Digitized by Google

Digitized by Google

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. **Die Hypothesen seit den ältesten Zeiten bis zum Jahre 1870** 1

Zusammenfassung der wichtigsten Resultate bis zum Jahre 1870 . 28

II. **Die Hypothesen vom Jahre 1870 bis in die Gegenwart** 29

1. Zusammensetzung der Erdkruste 29
2. Die mittlere Erddichte 30
3. Verteilung der Dichte im Erdinnern 33
4. Chemische Zusammensetzung des Erdinnern 35
5. Temperatur des Erdinnern 38
   a) Temperaturbeobachtungen in Tunnels und Bergwerken 38
   b) Temperaturbeobachtungen in Bohrlöchern 38
   c) Die Ursache der zentralen Erdwärme 46
   d) Die Höhe der Temperatur im Erdinnern 51
6. Zustand des Erdinnern 52
   a) Gasförmiger Zustand 52
      Das Alter der Erde 61
      Die Ursache der Eiszeiten 64
   b) Flüssiger Zustand 65
      Verhalten der verschiedenen Stoffe beim Übergang vom isotropen in den anisotropen Zustand 74
   c) Fester Zustand 82
7. Schlußfolgerungen 86
8. Zusammenfassung der wichtigsten Resultate 87
9. Rückblick auf die Entstehung der Erde 89

Literaturverzeichnis 93

Alphabetisches Autorenverzeichnis 103

Digitized by Google

Digitized by Google

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

I.

Die Hypothesen seit den ältesten Zeiten bis zum Jahre 1870.

Schon in den ältesten Zeiten haben sich die Gelehrten nicht allein damit begnügt, die Erdoberfläche zu erforschen, sondern sie haben sich auch über die Temperatur und den Zustand der unter der Oberfläche befindlichen Schichten eine Vorstellung zu machen gesucht. So war z. B. Plato[1]) der Ansicht, daß das Erdinnere flüssig sei, wie aus folgender Stelle in seinem Phaedon hervorgeht:

τρίτος δὲ ποταμὸς τούτων κατὰ μέσον ἐκβάλλει, καὶ ἐγγὺς τῆς ἐκβολῆς ἐκπίπτει εἰς τόπον μέγαν πυρὶ πολλῷ καιόμενον, καὶ λίμνην ποιεῖ μείζω τῆς παρ' ἡμῖν θαλάττης, ζέουσαν ὕδατος καὶ πηλοῦ· ἐντεῦθεν δὲ χωρεῖ κύκλῳ θολερὸς καὶ πηλώδης περιελιττόμενος δὲ ἄλλοσέ τε ἀφικνεῖται καὶ παρ' ἔσχατα τῆς Ἀχερουσιάδος λίμνης, οὐ συμμιγνύμενος τῷ ὕδατι· περιελιχθεὶς δὲ πολλάκις ὑπὸ γῆς ἐμβάλλει κατωτέρω τοῦ Ταρτάρου. οὗτος δ'ἐστὶν ὃν ἐπονομάζουσιν Πυριφλεγέθοντα, οὗ καὶ οἱ ῥύακες ἀποσπάσματα ἀναφυσῶσιν, ὅπῃ ἂν τύχωσι τῆς γῆς.

Der 3. Fluß entspringt in der Mitte zwischen beiden und strömt nahe am Ausflusse in eine von vielem Feuer brennende Gegend und bildet einen Sumpf, welcher größer als das Meer bei uns ist und von Wasser und Schlamm siedet. Da fließt er im Kreise trübe und schlammig weiter und kommt in Windungen außer andern auch an die Grenze des Acherusischen Sees, ohne sich mit dem Wasser zu vermischen; und nachdem er sich oftmals unter der Erde herumgewunden, fällt er noch tiefer in den Tartarus. Das ist der, den man Pyriphlegethon nennt, von welchem auch die Lavaströme, wo es deren auch auf der Erde geben mag, Stücke heraufblasen.

Auch die Kirchenväter glauben an ein flüssiges Innere; sie verlegen dorthin das kochende Höllenfeuer und suchen in den Vulkanen den Sitz der verdammten Seelen[2]) [3]).

Digitized by Google

Im Mittelalter wurde keine neue Hypothese über das Erdinnere aufgestellt, sondern man begnügte sich damit, die aus dem Altertum überkommene, das Innere sei flüssig, zu glauben.

Nach der Urstofflehre des Aristoteles ist das Feuer das leichteste der vier Elemente und muß demnach vom Erdmittelpunkt am weitesten entfernt sein. Daher glauben auch konsequente Aristoteliker, wie z. B. Giordano Bruno, nicht an ein Zentralfeuer[4]).

Erst um die Mitte des 17. Jahrhunderts, nachdem Mathematik und Naturwissenschaften einen bedeutenden Aufschwung genommen hatten, begann man, sich eingehender mit der Frage über die Tem peratur und den Zustand des Erdinnern zu beschäftigen. Deskartes[170]) (1644) sprach zuerst die Ansicht aus, die Erde sei einst in demselben Zustand gewesen wie die Sterne. Infolge der Abkühlung seien die äußersten Schichten erstarrt, während sich im Innern noch glutflüssiges Gestein vorfinde. Ferner ist der Jesuitenpater Athanasius Kircher (1665) zu nennen, der aus den Angaben von Schemnitzer Bergleuten auf eine Temperaturzunahme nach dem Innern schloß: „De aestu et frigore fodinarum, quibusnam in partibus maxime dominentur: Utrum quo profundiores, eo calidiores sint, et num videantur ignes subterranei? Respondit, in venis illis nullum immodicum aestum vel frigus percipi, nisi aurae liber transitus impediatur, tum fossas semper calidiores, usque dum iterum transpiratione libera fruantur, mediantibus spiraculis“[5]). X, S. 184 Ad. 11. An einer anderen Stelle spricht er sich folgendermaßen für ein feuriges Erdinnere aus: „Si ex ullo signo ignis subterranei veritatem cognoscere possumus, certe ex montibus flammivomis aliisque sulphureis crateribus, quos vulcanios vocant, eam ita luculenter spectamus, uti qui eam negare voluerit, omnium opinione temerarius, ne dicam vesanus et stolidus existimari debeat“[5]); IV, S. 179. Ebenso glaubte der Physiker Boyle (1680) an eine Temperaturzunahme nach dem Innern zu[6]).

Einen ganz abweichenden Standpunkt nahm Halley (1692) ein, der sich das Innere hohl dachte. In diesem Hohlraum bewege sich ein kleiner Planet, der die Veränderung der magnetischen Elemente bewirke[7]). Newton[171]) (1687) schließt aus der Abplattung der Erde auf einen ehemals feurig-flüssigen Zustand, eine Ansicht, die sich auch bei Leibniz[8]) (1749) und Deskartes findet, die beide die Erde als einst flüssig und jetzt aus einem flüssigen Kern mit einer durch Abkühlung erstarrten Kruste bestehend annehmen. Für eine Temperaturzunahme nach innen trat auch der Mediziner Boerhave (1732) in seiner Schrift „Elementa chemiae“ ein[9]). Im Gegensatz zu den bis-

Digitized by Google

herigen Hypothesen behauptete Aepinus (1761), die Erde sei bei ihrer Entstehung ohne jede Wärme gewesen. Erst nachdem sie den Sonnenstrahlen ausgesetzt war, wurde sie allmählich von der Oberfläche her erwärmt[10]).

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts wurde durch die Beobachtungen von de la Hire und Cassini de Tury[11a]), [15]) III, S. 987 festgestellt, daß ein im Keller der Pariser Sternwarte 1671 aufgestelltes Thermometer seinen Stand fast nicht veränderte. Diese Beobachtungen bewiesen, daß schon in ganz geringer Tiefe der Wechsel der Jahreszeiten sich nicht mehr geltend macht, daß also die Sonnenwärme nur bis zu einer ganz geringen Tiefe der sogenannten neutralen oder invariablen Schicht eindringt, und daß die jenseits jener Schicht beobachtete Temperaturzunahme nicht von der Sonne, sondern von einer später näher zu erörternden Ursache abhängig sein muß. Je geringer in einer Gegend der Unterschied zwischen Sommer und Winter ist, um so näher liegt diese Schicht der Oberfläche; daher ist sie an dem Äquator der Oberfläche am nächsten und an den Polen am weitesten davon entfernt. Die zahlenmäßigen Angaben der einzelnen Forscher über die Tiefe der neutralen Schicht weichen ziemlich voneinander ab. So gibt z. B. Boussingault[12]) $^1/_2$ m Tiefe, Wild[12]) 5 m und Richthofen[13]) $^2/_3$—1 m für die Tropen an.

Während Marschall von Bieberstein[14]) und Zach[15]) IV_2, S. 1247 die Erde für ein festes Agglomerat von Meteoriten halten, tritt J. C. Fischer[16]) (1805) für die Leibnizsche Ansicht ein, daß die Erde aus einem flüssigen Kern bestehe, der mit einer festen Kruste umgeben sei. Selbst Halleys phantastische Ansicht hatte um jene Zeit noch Anhänger. Nicht nur Franklin und Lichtenberg[17]), [18a]), [19]) glauben an ein hohles, mit stark komprimierter Luft erfülltes Innere, sondern Steinhäuser[20]) (1817) berechnete sogar die Bewegung eines intratellurischen, stark magnetischen Planeten „Minerva", der sich in 440 Jahren einmal um den $^1/_5$ Erdradius entfernten Mittelpunkt der Erde bewege und die magnetischen Erscheinungen, die wir auf der Erdoberfläche beobachten, hervorbringe. Zwei Jahre später suchte er von neuem die Existenz eines Planeten im Erdinnern zu beweisen[21]).

Geradezu märchenhaft sind die Beschreibungen vom Kapitän Symmes in St. Louis, der glaubt, das hohle Innere bestehe aus mehreren bewohnbaren Sphären. Der Eingang befinde sich an beiden Polen, die einen Öffnungswinkel von 12—16° besässen. Ja, er forderte sogar im Jahre 1819 öffentlich in amerikanischen, deutschen, englischen und französischen Zeitungen zu einer Expedition nach diesem neuen, reichen und warmen Lande, voll nützlicher Ge-

Digitized by Google

wächse und Tiere, vielleicht auch Menschen, auf. Diesen Schilderungen stehen die Bilder, die uns Chladni (1819) vom Erdinnern entrollt, an Abenteuerlichkeit nicht nach[22]).

1822 erschien in Paris Fouriers grundlegendes Werk „Théorie analytique de la chaleur"; auch er nimmt darin Stellung zur Frage über die Temperatur und den Zustand des Erdinnern. Er behauptet, daß die täglichen, durch den Wechsel von Tag und Nacht bedingten Wärmeschwankungen in 3 m Tiefe, und die jährlichen in viel weniger als 60 m nicht mehr wahrnehmbar sind. Jenseits dieser Niveaufläche konstanter Temperatur nimmt die Wärme zu, und zwar ist die innere Erdwärme ein Rest der ursprünglichen Ballungswärme[23]). In einer zwei Jahre später erschienenen Abhandlung behandelt er auf physikalischer Grundlage eingehend die Wärmeverhältnisse der Erde. Er weist nach, daß die Erde im Innern noch flüssig ist und fortwährend Wärme an den Weltenraum verliert, dessen Temperatur von der Wärme abhängig sein soll, die von den unser Sonnensystem umgebenden Sternen ausgestrahlt wird[24]). Diese Behauptung ist insofern nicht richtig, als der Weltenraum leer ist und also in verschiedenen Gegenden keine Temperaturunterschiede aufweisen kann.

Auf der von Fourier geschaffenen Grundlage ruhen die in der nächsten Zeit veröffentlichten Arbeiten. Allen ist die Ansicht gemeinsam, die Erde sei im Innern flüssig und verliere an den kalten Weltenraum Wärme.

Die ersten richtigen Versuche, um die Temperaturzunahme nach dem Erdinnern zu finden, sind von Cordier (1828)[25]) angestellt worden. Während z. B. Fox[26]) in den Zinnbergwerken von Cornwall die Temperatur der Grubenluft maß, versenkte er seine Thermometer, die auf gleichen Gang geprüft waren, in das Gestein selbst. Er beobachtete in drei weit voneinander gelegenen Kohlengruben in Frankreich, nämlich in den Gruben zu Carmeaux (Depart. Tarn), Decise (Depart. Nièvre), Littry (Depart. Calvados) und kam dabei zu folgenden Resultaten:

„1. Meine Beobachtungen bestätigen vollkommen das Dasein einer inneren Wärme, welche der Erde eigentümlich ist, nicht von den Sonnenstrahlen herrührt und schnell mit der Tiefe zunimmt.

2. Die Zunahme der unterirdischen Wärme mit der Tiefe folgt nicht überall demselben Gesetze; sie kann in einem Lande doppelt und sogar dreimal so groß wie in einem andern sein.

3. Diese Unterschiede stehen in keinem konstanten Verhältnisse zur geographischen Breite oder Länge.

Digitized by Google

4. Endlich ist die Zunahme gewiß rascher als man geglaubt hat; sie kann in gewissen Ländern einen Grad für 15, ja selbst für 13 m betragen; vor der Hand kann man aber für einen Grad wenigstens 25 m annehmen."

Auch J. C. Eduard Schmidt[27]) in seinem „Lehrbuch der mathematischen Geographie" (1829) befaßt sich mit der Frage über das Erdinnere.

Im I. Bande sind besonders seine Untersuchungen über die Dichte der Erde von Bedeutung.

Im II. Bande behandelt er in den §§ 251—258 die Hypothesen über die Temperatur des Erdinnern. Er weist zunächst die Ansicht zurück, daß die Temperatur des Innern weiter nichts als aufgespeicherte Sonnenwärme sei, die von der erwärmten Oberfläche nach dem Innern fortgeleitet worden ist. Wenn dem so wäre, sagt er, so müßte die Temperatur mit wachsender Tiefe nicht zu- sondern abnehmen, da die Erde ein schlechter Wärmeleiter ist. Ebenso unhaltbar sei die Behauptung einiger Neptunisten, daß die Wärmezunahme in den Bergwerken nur durch lokale Einflüsse bedingt sei, z. B. Zersetzung von Schwefelkiesen durch Wasser, die Anwesenheit der Arbeiter, die Lichter, das Sprengen etc. Er leugnet ja nicht, daß diese Umstände von Einfluß sein können, jedoch sind sie nicht imstande, die regelmäßige Temperaturzunahme, wie sie überall beobachtet ist, zu erklären.

Aus der jetzigen Gestalt der Erde schließt er auf deren einstige Flüssigkeit, und zwar kann diese nicht dadurch bedingt gewesen sein, daß die jetzt festen Massen mit Wasser untermischt einen Brei gebildet haben. Denn das heute auf der Oberfläche befindliche Wasser reicht dazu nicht aus, und im Innern können sich keine größeren Wassermengen befinden, sondern viel dichtere Massen, da, wie im ersten Teil des Buches gezeigt wird, die mittlere Dichte der Erde 4,785 mal so groß ist, als die des Wassers. Die Erde kann also nur glutflüssig gewesen sein. Er hält es nicht für unwahrscheinlich, daß sie sich aus Meteoriten gebildet hat. Im übrigen verweist er auf die oben erwähnten Arbeiten Fouriers. Ferner führt er noch den Beweis von Laplace[28]) an, daß sich die Temperatur der Erde seit den Zeiten, wo wir astronomische Beobachtungen haben, nicht geändert hat. Denn eine Temperaturverringerung hätte nach seiner Meinung eine Vermehrung der Umdrehungsgeschwindigkeit zur Folge gehabt, das heißt mit anderen Worten eine Verkürzung des Tages. Aus den Mondfinsternisbeobachtungen seit Hipparch ergibt sich aber, daß seit jener Zeit die Tagesdauer nicht um $^1/_{100}$ Sekunde abgenommen hat, was für eine konstante Erdtemperatur seit mindesens 2000 Jahren

Digitized by Google

spricht. In §§ 337—352 gibt er einen Überblick über die wichtigsten Methoden zur Bestimmung der mittleren Erddichte. Bei der ersten, von Newton vorgeschlagenen, beobachtet man die Ablenkung eines Bleilotes durch einen Berg, dessen Masse und Gestalt bekannt sind. Sie wurde hauptsächlich von Maskelyne und Hutton in den Jahren 1774—1776 am Berge Shehallien in Pertshire angewendet. Die zweite Methode besteht in der Beobachtung von Pendelschwingungen am Fuße und auf dem Gipfel eines Berges, wie sie Carlini am Mont Cenis anstellte. Drittens benutzt man die Drehwage, deren Einrichtung und Anwendung Cavendish, der sie auch zuerst gebrauchte, näher beschrieben hat[29]).

In den dreißiger Jahren des vorigen Jahrhunderts begann man genauere Beobachtungen, besonders in Bohrlöchern, anzustellen, um einen möglichst guten Wert für die geothermische Tiefenstufe zu erhalten. Anfangs verwendete man zu diesen Temperaturbeobachtungen gewöhnliche Thermometer, deren Gang man träge machte, indem man sie mit schlecht leitenden Substanzen umgab, z. B. Stearin, wodurch sie zwar lange brauchten, um die Temperatur des Beobachtungsortes anzunehmen, diese dann aber auch ebensolange behielten. Zur Verfeinerung der Beobachtungen wurden besondere Geothermometer konstruiert, von denen hier nur die von Magnus[30]) und Walferdin[31]) erwähnt werden mögen. Die Einrichtung des ersteren ist kurz folgende: Ein gewöhnliches Thermometer wird in eine offene Spitze, die nach der Seite umgebogen ist, ausgezogen und dann mit soviel Quecksilber gefüllt, daß es bei der Temperatur im Bohrloch sicher aus der Spitze austritt. Zur Beobachtung bringt man zunächst das Geothermometer mit einem nach derselben Skala geteilten gewöhnlichen auf gleiche Temperatur, so daß beide dieselbe Anzahl Grade zeigen. Dann wird das Instrument an den Beobachtungsort gebracht, wo ein Teil des Quecksilbers ausfließt. Hierauf bringt man beide Thermometer wieder auf dieselbe Temperatur und kann nun aus der Differenz des Standes beider Thermometer die maximale Temperatur, auf die es erwärmt war, finden. Das Walferdinsche Instrument ist vom eben beschriebenen nicht allzusehr verschieden. Während dort die Spitze umgebogen ist, ist sie hier aufrecht, und vor allen Dingen sind die Gefäße zum Aufnehmen des ausfließenden Quecksilbers verschieden. Magnus stellte mit seinem Geothermometer im Bohrloche zu Rüdersdorf bei Berlin, das damals 600 Fuß tief war, Beobachtungen an und fand in

380	Fuß	Tiefe	13,7° R
500	„	„	14,2° R
655	„	„	15,8° R 15,9° R

Digitized by Google

Als mittlere Jahrestemperatur von Rüdersdorf nimmt er 7,6 ° R an und findet also auf 655 Fuß eine Temperaturzunahme von (15,9 ° — 7,6 °) = 8,3 ° R, d. h. 1,25 ° R auf 100 Fuß. Dieser Wert stimmt ziemlich gut mit den von Cordier [25]) und Kupffer [32]) gefundenen überein. Sie erhielten 25 m bez. 24,4 m auf 1 ° R. Noch genauere Beobachtungen wurden von Erman [33]) (1831) im Bohrloche zu Rüdersdorf gemacht, wo er unter Berücksichtigung der störenden Einflüsse eine Temperaturzunahme von 1 ° R für 90 Fuß Tiefenzunahme fand. Gerhard [34]) kommt auf Grund einer Zusammenstellung der Temperaturbeobachtungen in den Gruben Preußens zu der Ansicht, daß aus allen diesen Beobachtungen nur folge, die Temperatur nehme mit wachsender Tiefe zu, daß aber eine quantitative Bestimmung dieser Temperaturzunahme aus dem vorliegenden Material noch unmöglich sei. Zu demselben Resultat gelangt er bezüglich der von Erman und Magnus in Rüdersdorf angestellten Temperaturbeobachtungen [35]).

Infolge der großen Verschiedenheit der einzelnen Werte für die geothermische Tiefenstufe nahm Kupffer [36]) eine Sichtung des vorhandenen Materials vor. Den Beobachtungen in Gruben mißt er nur geringe Bedeutung bei, da sie durch Luftströmungen, Eindringen der Tagewässer, Anwesenheit der Arbeiter etc. ungenau werden. Er hält die Beobachtungen in artesischen Brunnen mit möglichst viel Wasser für die besten und beobachtete selbst in vier artesischen Brunnen in der Nähe von Wien, wobei er folgende Resultate erhielt:

I.	Brunnen	243	Wiener	Fuß	tief	11,0 ° R
II.	„	108	„	„	„	9,3 ° R
III.	„	108	„	„	„	9,3 ° R
IV.	„	60	„	„	„	9,0 ° R

Daraus berechnete er mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate eine geothermische Tiefenstufe von 25,4 m für 1 ° R. Für einen artesischen Brunnen bei Rochelle fand er 24,6 m für 1 ° R, und Beobachtungen in Gruben des Ural ergaben 24,8 m, in Cornwall, Sachsen und Frankreich 26,9 m für 1 ° R.

Im Jahre 1834 veröffentlichte Reich [37]) eine Zusammenstellung aller bis dahin in den sächsischen Bergwerken gemachten Beobachtungen und fand als Mittelwert 41,84 m Tiefenzunahme auf 1 ° C Temperaturzunahme; er sagt jedoch ausdrücklich, daß man aus den bisher gemachten Beobachtungen ein Gesetz für die Zunahme der Wärme nach dem Erdinnern nicht ableiten könne. Auf S. 138—152 gibt er noch eine „Übersicht der Literatur, die Temperatur des Erdinnern betreffend", die außer den hier erwähnten Arbeiten nichts wesentlich Neues enthält.

Digitized by Google

Eine ganz neue und eigenartige Erklärung für die Temperaturzunahme nach dem Erdinnern gibt Poisson[38]). Er nahm Anstoß daran, daß die Mehrzahl der Physiker und Geologen für den Mittelpunkt der Erde eine unsere menschlichen Begriffe weit übersteigende Temperatur annehmen. Bei einer Temperaturzunahme von 1° C für 30 m würde die Mittelpunktstemperatur mehr als 2 Millionen Grad betragen, und infolge dieser hohen Temperatur würden sich alle Stoffe als glühende Gase vorfinden, die jedoch so stark komprimiert wären, daß ihre Dichte über fünfmal so groß wäre, als die des Wassers. Poisson glaubt nun, daß die Erdkruste nicht imstande sei, einem Druck, wie ihn derartig stark komprimierte Gase ausüben, widerstehen zu können und sucht infolgedessen eine andere Erklärung für die höhere Temperatur des Erdinnern. Aus der kugelförmigen, an den Polen abgeplatteten Gestalt der Erde schließt er auf einstige Flüssigkeit der ganzen Erdmasse, die sich durch Wärmeabgabe an den kalten Weltenraum abkühlte. Die Erstarrung hat jedoch nicht, wie allgemein bisher angenommen wurde, an der Oberfläche begonnen, sondern im Mittelpunkt, da die zentralen Schichten infolge des hohen Drucks schon bei Temperaturen erstarren konnten, bei denen die äußeren noch lange flüssig sind. Nachdem die Erde von innen her erstarrt war und ihre ganze Wärme verloren hatte, kam unser Planetensystem in wärmere Gegenden des Weltraums, und die Erde begann sich von außen nach innen zu erwärmen; passiert sie dann wieder kältere Regionen, so wird man nach dem Erdinnern eine Temperaturzunahme finden, ohne eine allzuhohe innere, unsere menschlichen Begriffe weit übersteigende Temperatur annehmen zu müssen. Die verschiedene Temperatur des Weltraums soll von der Wärme abhängig sein, die von den dort befindlichen Fixsternen ausgestrahlt wird, eine Ansicht, die sich schon bei Fourier (s. S. 4) findet und als falsch zurückgewiesen wurde.

Hören wir nun einige Urteile über Poissons Hypothese.

Im großen und ganzen zustimmend spricht sich Lamont[39]) aus: „Will man auch die Gültigkeit dieser Erklärung und die Möglichkeit der von Herrn Poisson vorgeschlagenen Beweisführung nicht ohne Bedenken zugeben, so ist es jedenfalls nicht zu leugnen, daß die neue Theorie viele Vorzüge entwickelt. Der Grund, den sie für die Zunahme der Wärme im Innern der Erde angibt, ist eben so begreiflich als befriedigend. Wir brauchen dabei weder eine Temperatur anzunehmen, die alle bekannten Erdstoffe in Dampf verwandeln müßte; wir brauchen auch nicht in die Dunkelheit einer vor Erschaffung des Menschengeschlechts gewesenen Periode zurückzugehen, wohin uns manche Physiker so gerne führen, um uns zu überzeugen von

Digitized by Google

dem, was Niemand wissen kann." Es fehlt aber auch nicht an direkten Gegnern der Poissonschen Ansicht. De la Rive[38]) S. 97 stimmt zwar mit ihm darin überein, daß das Erdinnere nicht flüssig sein müsse, um die Temperaturzunahme zu erklären; jedoch hält er es für nötig, eine eigene Wärmequelle im Innern der Erde anzunehmen, und er ist der Ansicht, daß es chemische Prozesse seien, die die Temperaturzunahme nach dem Innern bedingten. Poggendorff[38]) S. 98 wendet sich besonders gegen die Anschauung, daß die erkalteten Massen nach dem Mittelpunkt eingesunken seien, und die Erstarrung von dort aus begonnen habe. Er hält es auch für unmöglich, daß eine Flüssigkeit bei hoher Temperatur durch Druck verfestigt werden könne, zumal wenn sie sich bei ihrer Erstarrung ausdehnt. Gerade wenn man ein flüssiges Innere voraussetzt, braucht man nicht so unglaublich hohe Temperaturen anzunehmen, wie für einen festen Erdkern, da die Temperatur nur bis zu den flüssigen Massen zunimmt und innerhalb dieser infolge der auftretenden Strömungen fast konstant sein wird. Auch Naumann[40]) S. 61, 62 spricht sich für eine Erstarrung von der Oberfläche her aus und fügt hinzu, Poisson habe an Stelle einer Hypothese zur Erklärung der Temperaturzunahme deren zwei gesetzt, die sich ebensowenig beweisen lassen, da wir für die von ihm angenommene Verschiedenheit der Temperatur des Weltraums keinen Beweis haben. Ebenso haben Humboldt[41*]), D'Archiac[42*]), und Pilar[43*]) die Poissonsche Hypothese bekämpft.

Im Jahre 1837 veröffentlichte Bischof[44]) eine umfangreiche, von der holländischen Sozietät der Wissenschaften gekrönte Preisschrift über die Temperatur und den Zustand des Erdinnern.

Er weist zunächst an der Hand eines reichen Materials und eingehender eigener Studien den Einwurf zurück, daß die höhere Temperatur der Säuerlinge, die doch als ein Beweis für die Temperaturzunahme nach dem Erdinnern angesehen wird, etwa eine Folge der Kohlensäureabsorption sei. Ebenso unhaltbar ist die Annahme, die Wärme der Thermen sei immer durch chemische Prozesse oder lokale Ursachen bedingt, wenn sie auch in ganz vereinzelten Fällen die Ursache sein können, wie z. B. in der Nähe von Erdbränden die Quellen eine erhöhte Temperatur zeigen. Auf S. 136 geht er auf eine merkwürdige, im nördlichen Sibirien gemachte Beobachtung ein, die im ersten Augenblick gegen eine Temperaturzunahme und ein feurig-flüssiges Innere zu sprechen scheint. Man versuchte in Jakutsk im Jahre 1830 einen Brunnen zu graben, befand sich jedoch in 78 Fuß Tiefe noch in gefrorenem Boden. Im folgenden Jahre grub

Digitized by Google

man bis 90 Fuß, aber der Boden war immer noch gefroren. Trotzdem spricht auch diese Beobachtung nicht gegen, sondern für eine Temperaturzunahme. Denn während einige Fuss unter der Oberfläche — 6 ° waren, stieg das Thermometer am Grunde bis auf — 1 °. Die ganze Erscheinung ist nur dadurch bedingt, daß in den höheren Breiten die mittlere Jahrestemperatur des Bodens unter dem Gefrierpunkt liegt, und daß im Sommer nur die oberen Erdschichten auftauen, während man darunter stets gefrorene Schichten antrifft, in denen jedoch die Temperatur mit wachsender Tiefe zunimmt.

Die Beobachtungen im Schergin-Schacht wurden im Jahre 1844, als der Schacht eine Tiefe von 382 engl. Fuss erreicht hatte, von Middendorff[45]) im Auftrage der Petersburger Akademie wiederholt, besonders um festzustellen, ob nicht die Atmosphäre einen erkaltenden Einfluß auf die Wandungen ausgeübt hätte. Zu diesem Zwecke wurden an jedem Beobachtungsort zwei Thermometer in die Schachtwand eingelassen, eins 1 engl. Fuß tief und das andere 7 engl. Fuß tief. Aus den Beobachtungen zieht Middendorff den Schluß, daß bis 50 Fuß allerdings die äußere Temperatur einen störenden Einfluß hat, daß aber die dann gefundenen Temperaturen davon unabhängig sind, und daß die in 382 Fuß Tiefe gefundenen 2,4 ° R so gut als möglich die Bodentemperatur angeben. Gerade entgegengesetzter Ansicht ist Bär[46]), der auf Grund von Temperaturbeobachtungen in anderen Gruben und Bohrlöchern in der Umgebung von Jakutsk auf eine bedeutende Abkühlung des Schergin-Schachtes durch die kalte Atmosphäre schließt. Er sucht dies auch durch folgende Tabelle, welche die Beobachtungen des älteren Schergin denen von Middendorff gegenüberstellt, zu beweisen:

Schergins Beobachtungen			Temperaturen derselben Tiefe nach den Beobachtungen der Sibirischen Expedition 1844—46	Differenzen
Zeit der Beobachtungen	Tiefe	Temperatur in R °		
?	77	— 5,5	— 5,97	— 0,47
?	119	— 4,0	— 4,99	— 0,99
?	217	— 2,0	— 3,70	— 1,70
1. April 1836	301	— 1,0		
15. Okt. 1836	—	— 1,5	— 3,10	— 2,22
27. Nov. 1836	—	— 0,5		
28. Jan. 1837	—	— 0,5		
31. März 1837	373	— 0,5	— 2,51	— 2,01

Es geben also die Beobachtungen im Schergin-Schacht keinen Anhalt für die Bodentemperaturen in Jakutsk, da sie infolge der eindringenden Kälte in einer Scheide von Bodeneis angestellt wurden, die sich mit wachsender Schachttiefe gleichfalls verlängerte; zuver-

Digitized by Google

lässiger sind die in den neuen Gruben gefundenen Werte, die in 50 Fuß Tiefe — 2,5 bis — 3° R ergeben.

Andere Forscher, wie Parrot[47]) haben in der in den Meeren und Seen beobachteten Temperaturabnahme mit der Tiefe einen Beweis gegen ein heißes Erdinnere erblickt, da nach ihrer Meinung, wenn wirklich das Innere eine hohe Eigenwärme besitzt, auch das Wasser am Grund der Seen und des Meeres wärmer sein müßte als an der Oberfläche. Bischof zeigt im 11. Kapitel aber gerade, daß sich die Temperaturverhältnisse in den Meeren und Seen nur aus einer Wärmezunahme nach dem Erdinnern erklären lassen. Denn gäbe das Innere keine Wärme ab, so müßte am Grunde stets die Temperatur sein, die der größten Dichte des Wassers entspricht, während alle Beobachtungen eine mehr oder minder erhöhte Temperatur je nach der Tiefe ergeben. Dieser Überschuß über die Temperatur der maximalen Dichte des Wassers kann nur durch die vom Erdinnern abgegebene Wärme hervorgerufen werden. Auch Klöden[48]) weist den Einwand Parrots entschieden zurück, indem er ungefähr dasselbe ausführt wie Bischof. Nachdem der Letztere im 12. bis 17. Kapitel die störenden Einflüsse (vgl. auch [49]) wie Meteorwasser, Thermen, Luft, Klima und ungleiches Leitungsvermögen der Gebirgsarten eingehend besprochen hat, kommt er zu folgendem Resultat: „Die bisherigen Temperaturbeobachtungen in Gruben haben demnach so sehr verschiedene Werte über die Wärmezunahme nach dem Innern gegeben, daß es unmöglich ist daraus ein Gesetz abzuleiten. Dies kann nicht befremden, wenn man die vielen Einflüsse berücksichtigt, welche störend auf dieses Gesetz wirken" (S. 245). Eine überaus günstige Gelegenheit zu einer möglichst genauen Beobachtung der Temperaturzunahme bot sich im Bohrloche zu Pregny bei Genf. Man bohrte 682 Fuß tief, um einen artesischen Brunnen anzulegen, erhielt jedoch kein springendes Wasser, sondern anfangs einen dicken Schlamm und später nur feuchte Erde. Auf diese Weise waren die störenden Wasserzirkulationen ebenso beseitigt, wie auch die nachteiligen Einflüsse, welche Luftströmungen in trockenen Bohrlöchern hervorbringen. Die Beobachtungen ergaben:

Tiefe in Fuß	Temperatur in °R.	Tiefe in Fuß	Temperatur in °R.
30	8,4	400	11,37
60	8,5	450	11,73
100	8,8	500	12,20
150	9,2	550	12,63
200	9,5	600	13,05
250	10,0	650	13,50
300	10,5	680	13,8
350	10,9		

Digitized by Google

Daraus ergibt sich 114,8 Fuß Tiefenzunahme auf 1° R (vergl. auch [50]). Weiterhin geht Bischof auf die vulkanischen Erscheinungen ein und zeigt, daß auch sie sich nur in befriedigender Weise durch eine Temperaturzunahme nach dem Innern erklären lassen und nicht durch chemische Wirkungen (S. 256—338). Auch gegen die oben erwähnte Hypothese von Poisson nimmt er Stellung, besonders gegen die Behauptung, daß die erstarrten Krustenteile nach dem Innern einsinken, und so die Erstarrung von innen her beginne. Geradeso wie Eis auf Wasser, festes Eisen auf geschmolzenem, feste Lava auf flüssiger schwimmen, geradeso wahrscheinlich sei es, daß die an der Oberfläche erstarrten Teile nicht alle eingesunken sind, sondern daß sie auf den flüssigen Massen schwammen. Es ist auch, wie schon Poggendorff hervorgehoben hat, unnötig, für das Innere eine so enorm hohe Temperatur anzunehmen, wenn man es als flüssig voraussetzt, da die Temperatur innerhalb der Flüssigkeit infolge von Strömungen ziemlich konstant sein wird (S. 368). Um die Abkühlungsverhältnisse an geschmolzenen Kugeln zu studieren, ließ Bischof auf der Saynerhütte zweimal Basaltkugeln gießen, an denen er bei der Abkühlung Temperaturbeobachtungen anstellte (S. 443). Im ersten Falle hatte die Kugel einen Durchmesser von 21 Zoll und war mit einem $1^1/_2$ Zoll dicken Lehmmantel umgeben, der im Innern mit dünnen Eisenstäben und Drähten gebunden war. Das Ganze befand sich in einem eisernen Kessel, unmittelbar vor dem Schmelzofen und war ringsum mit Formsand eingedämmt. Die Schmelzhitze des Basalts war größer als die des Kupfers, da ein eingetauchter Kupferdraht schmolz, also sicher über 1118° R (1084° R nach Kohlrausch). Vier Stunden nach dem Guß nahm man die Kugel mit dem Lehmmantel heraus und setzte sie auf einen Trichter von Eisenblech, damit eine möglichst freie Ausstrahlung der Wärme stattfände. Acht Stunden nach dem Guß hatte der Mantel eine Temperatur von 240° R, und nun begann man mit den Temperaturbeobachtungen. Es wurden Thermometer eingesetzt. No. I in den Mantel; II und III wollte man 2 bez. 7 Zoll tief und IV in den Mittelpunkt setzen. Es waren aber beim Guß die mit Lehm überzogenen Blechröhren, welche die Thermometer aufnehmen sollten, geschmolzen und der flüssige Basalt hineingedrungen. Man versuchte daher, die drei Löcher auszubohren, eine Arbeit, welche die Beobachtungen ganz empfindlich störte, einerseits, weil sie vier Stunden unterbrochen werden mußten und dann, weil durch das Bohren Wärme erzeugt wurde. Trotz großer Bemühungen gelang es jedoch nur das 2. Loch bis zu 2 Zoll auszubohren, das 3. und 4. nur bis 4 Zoll; dies war insofern ein großer Nachteil, als die

Digitized by Google

Blechröhren im 3. und 4. Bohrloche 2 bez. 8 Zoll tiefer gingen als die Thermometer, und daher die Temperatur infolge der Wärmeleitung in IV anfangs höher war als in III, obgleich doch beide gleich weit eingetaucht waren. Die Beobachtungen ergaben (S. 456—458):

		I.	II.	III.	IV.
30. Dez.	8 Uhr Abends	240°			
	9 „ „	226,25			
	10 „ „	213			
	11 „ „	201			
	12 „ „	189			
31. Dez.	1 Uhr Morgens	178,75			
	2 „ „	168,5			
	3 „ „	158			
	4 „ „	148,75			
	5 „ „	139			
	6 „ „	130,5			
	7 „ „	123			
	8 „ „	114,75	230,5*)		
	9 „ „	108,25	221		
	10 „ „	102	208		
	11 „ „	95,5	194,5		
	12 „ „	90	183		
	1 Uhr Nachm.	85	172		
	2 „ „	80	161		
Unterbrechung wegen Ausbohren der Löcher.					
	6 Uhr Abends	58,5*)	119*)	132,9*)	134,81*)
	7 „ „	57,0	114	126,4	127,81
	8 „ „	55	108	119,9	121,29
	9 „ „	52	102	112,8	114,27
	10 „ „	49,5	95,3	105,8	106,55
	11 „ „	47	90	99,72	100,24
	12 „ „	45	85,5	94,72	95,23
1. Jan.	1 Uhr Morgens	42,5	80	88,65	89,22
	2 „ „	40,2	75	83,08	83,19
	3 „ „	38	71	78,33	78,19
	4 „ „	36,5	67	74	73,67
	5 „ „	36,25	63	69,25	68,92
	6 „ „	32,5	59,5	65,47	65,16
	7 „ „	31	56	61,44	61,15
	8 „ „	29,5	53	58,44	58,14
	9 „ „	28	50	54,94	54,13
	10 „ „	26,75	47	51,36	50,87
	11 „ „	24,8	44,5	48,66	48,12
	12 „ „	23,6	42	45,81	45,4
	1 Uhr Nachm.	22,45	39,5	43	42,6
	2 „ „	21,4	37,5	40,6	40,1
	3 „ „	20,5	35,5	38,3	38,1
	4 „ „	18	33,5	36,26	36,09
	5 „ „	18,6	32	34.26	34,09
	6 „ „	17,9	30	32,73	32,08
	7 „ „	17,1	28,4	30,22	30,18
	8 „ „	16,35	27	29,22	28,77
	9 „ „	15,7	25,8	28,12	27,57
	10 „ „	14,95	24,3	26,42	26,06
	11 „ „	14,2	23	25,22	24,56
	12 „ „	13,55	22	23,84	23,05

*) Ungenaue Beobachtung.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Digitized by Google

		I.	II.	III.	IV.
2. Jan.	1 Uhr Morgens	13	21	22,64	22,3
	2 „ „	12,1	20	21,64	21,05
	3 „ „	11,9	19	20,64	20,05
	4 „ „	11,5	18	19,64	19,05
	5 „ „	11,1	17,25	18,64	18,05
	6 „ „	10,8	16,75	17,89	17,3
	7 „ „	10,3	16	17,14	16,54
	8 „ „	10,1	15,25	16,35	16,04
	9 „ „	9,7	14,7	15,6	15,24
	10 „ „	9,4	14	14,9	14,53
	11 „ „	9,2	13,5	14,17	14,03
	12 „ „	8,9	13	13,67	13,53
	1 Uhr Nachm.	8,7	12,5	13,17	13,03
	2 „ „	8,5	12	12,77	12,53
	3 „ „	8,3	11,75	12,07	12,03
	4 „ „	8,1	11,4	11,97	11,52
	5 „ „	8,0	11	11,37	11,02
	6 „ „	7,8	10,7	11,07	11
	7 „ „	7,7	10,5	10,87	10,52
	8 „ „	7,55	10	10,57	10,12
	9 „ „	7,4	9,8	10,27	9,92
	10 „ „	7,3	9,6	10,07	9,72
3. Jan.	9 Uhr Morgens	6,35	8		
	3 „ Nachm.	6,1	7,5		
4. Jan.	4 Uhr Nachm.	5,65	6,5*)		

Auf Grund der Erfahrungen bei der ersten Kugel ließ Bischof noch zwei Kugeln mit einem Durchmesser von 27,27 Zoll und 9,39 Zoll gießen, deren Herstellung nach Wunsch ausfiel. Leider habe ich nirgends die Temperaturbeobachtungen von diesem zweiten Guß finden können, sodaß ich mich auf die kurze Mitteilung aus der erwähnten Schrift[44]) S. 504 beschränken muß. Die Resultate stimmen mit den früheren überein. Die Temperaturzunahme in den erkaltenden Kugeln erfolgt also von außen nach innen in einer geometrischen Reihe.

Für die Temperaturzunahme nach dem Erdinnern in einer arithmetischen Reihe spricht sich Suckow[51]) aus, indem er zu beweisen sucht, daß die Erdwärme vom Mittelpunkt nicht mit dem Quadrat der Entfernung abnehmen kann. Es sei $\frac{C}{x^2}$ die Temperaturabnahme in der Entfernung x und die Wärmeintensität nehme um du ab, wenn x um dx wächst. Dann ist $du = \frac{2\,C}{x^3}\,dx$ und folglich $C = \frac{x^3}{2\,dx}\,du$. Setzt man $du = 1^0$, $dx = 100$ Fuß und $r = 19\,608\,954$ paris. Fuß, so erhält man für $C = 75\,398\,630\,000\,000\,000\,000^0$. Dann müßte die Erdoberfläche, wenn sie von der Sonnenwärme unabhängig wäre, eine Temperatur von $196\,090^0$ haben, woraus sich nach Suckows Ansicht das Unhaltbare der Annahme ergibt. Diese ganze Berechnung beweist aber gar nichts, da sie von dem für den Erdradius gewählten Maß-

*) Ungenaue Beobachtungen.

Digitized by Google

stab abhängig ist; das Resultat wird sofort ein viel kleineres, wenn man r nicht in Fuß, sondern in Meter angibt. Ebenso könnte man es auch beliebig vergrößern, wenn man r in cm, mm, oder einem noch kleineren Maß angäbe.

Einen neuen Weg schlug der Astronom W. Hopkins[52, 53]) S. 27—29 ein, um über die Beschaffenheit des Erdinnern Aufschluß zu erhalten. Ausgehend von einer Betrachtung über die Erstarrung der Erde kommt er zu dem Resultat, daß diese auf folgende zwei Arten möglich ist. Die Erde war einst eine flüssige Masse mit der größten Hitze im Mittelpunkt. Der Erstarrungspunkt einer solchen Masse wird durch Druck erhöht, gleichzeitig tritt aber mit dieser Druckerhöhung auch eine Temperaturzunahme ein. Wie nun die Erstarrung vor sich geht, hängt davon ab, ob die Druck- oder Temperaturzunahme die Oberhand behält. In der flüssigen Erdmasse trat bei der Abkühlung eine Zirkulation ein, indem die kalten Massen von der Oberfläche nach dem Zentrum sanken und die heißen nach oben stiegen. Durch diesen anfangs sehr lebhaften Prozeß kühlte sich die ganze Erde ab und erlitt eine Kontraktion, verbunden mit einer Vermehrung des Druckes im Innern. Ist jetzt die Temperaturzunahme größer als die Druckzunahme, so dauert die Zirkulation solange fort, als es die Zähigkeit der Masse zuläßt, und dann würde die Verfestigung von der Oberfläche her beginnen; im anderen Falle, wenn die Druckzunahme größer ist, beginnt die Erstarrung im Innern, das sich nun durch Leitung abkühlt, während in der darüber befindlichen Flüssigkeit die Zirkulation noch solange andauert, als es infolge der mit der Abkühlung wachsenden Zähigkeit möglich ist. Dann beginnt auch an der Oberfläche die Erstarrung, die von außen fortschreitend mit der vom Zentrum her zusammentrifft, sodaß dazwischen nur einzelne Lavaseen übrig bleiben, die das Material zu den heutigen Vulkanen liefern. Nach diesen einleitenden Betrachtungen geht Hopkins dazu über, die Präzession und Nutation zu berechnen, indem er verschiedene Annahmen über die Beschaffenheit des Erdinnern macht. Er kommt dabei zu dem Resultat, daß mindestens eine Krustendicke von $^1/_4$ oder $^1/_5$ Erdradius nötig ist, um der Erde den Grad von Starrheit zu geben, daß die Präzessionserscheinungen so auftreten, wie wir sie tatsächlich beobachten. Da bei einer so beträchtlichen Krustendicke eine direkte Verbindung zwischen dem Innern und den Vulkanen nicht möglich ist, so nimmt er in der Nähe der Oberfläche mit geschmolzener Lava gefüllte Hohlräume an, die das Material für die vulkanischen Erscheinungen liefern.

Digitized by Google

Um Aufschluß darüber zu erhalten, ob die Erde von innen oder außen erstarrt sei, stellte Bischof[54]) Versuche an über die Kontraktion der Gebirgsarten, nach dem Übergang vom feurig-flüssigen in den glasigen und kristallinischen Zustand. Er untersuchte Basalt, Trachyt und Granit und erhielt folgende Resultate:

Volumen im glasigen Zustand	Volumen im kristallinischen Zustand
Basalt = 1	Basalt = 0,9298
Trachyt = 1	Trachyt = 0,9214
Granit = 1	Granit = 0,8420

Volumen im flüssigen Zustand	Volumen im kristallinischen Zustand
Basalt = 1	Basalt = 0,896
Trachyt = 1	Trachyt = 0,8187
Granit = 1	Granit = 0,7481

Daraus geht deutlich hervor, daß diese drei Gesteine beim Übergang vom flüssigen in den glasigen Zustand eine Kontraktion erleiden, die sich bei der Kristallisation noch bedeutend vermehrt. Der Wert dieser Beobachtungen ist allerdings leider dadurch ein nur geringer, daß Bischof offenbar das Volumen im glasigen und kristallinischen Zustand bei gewöhnlicher Temperatur bestimmte und das im flüssigen bei Schmelztemperatur.

Eine besonders abweichende Tiefenstufe fanden Matteuci und Pilla[55]) in einem Brunnen am Monte Massi in Toscana. Sie erklären die äußerst rasche Zunahme, 1° C auf 13 m, durch die Annahme, in Italien befinde sich die zentrale Hitze näher der Oberfläche als z. B. in England, wodurch auch Italien, so reich an Vulkanen, Erdbeben etc. sei. Eine noch raschere Temperaturzunahme fand man zu Neuffen am Fuße der schwäbischen Alb, wo unter Leitung des Grafen Mandelsloh[56]) ein Bohrloch 1186 württembergische Fuß tief durch Dogger und Lias getrieben wurde. Es durchbrach schwarze, bituminöse Schiefertone, in denen sich 1—4 Fuß mächtige Kalksteinflötze befanden. Das ganze Gestein war mit Schwefelkies durchsetzt. In 77 Fuß 9 Zoll Tiefe wurde eine Quelle mit einem nach schwefliger Säure riechenden Wasser erbohrt, die ununterbrochen langsam überfloß, und deren Temperatur von derjenigen der Luft abhängig war, sodaß sie wahrscheinlich von einem Tagewasser der schwäbischen Alb herstammte. Die Beobachtungen in dem 2 Zoll weiten Bohrloch ergaben:

Digitized by Google

Tiefe in württemb. Fuß	Temperatur in C°
100	10,8
200	13,7
300	16,5
409	18,4
500	20,4
600	23,5
700	25,4
800	27,8
900	31,2
1000	33,5
1080	36,3
1180	38,7

Das entspricht einer Wärmezunahme von 3,28° C auf 100 württembergische Fuß oder 1° C auf 10,5 m, ein bis jetzt unerreicht kleiner Wert der geothermischen Tiefenstufe. Über die Ursachen dieser äußerst raschen Temperaturzunahme ist man bis heute noch nicht einig. Daubrée[57]) glaubt, daß es die Nachwirkung früherer basaltischer Durchbrüche sei, die erst nach der Ablagerung des Süßwasserkalkes stattgefunden haben können, wie dessen kristallinische Beschaffenheit beweisen soll. Infolge der langsamen Erkaltung intratellurisch erstarrender Gesteine und infolge ihrer schlechten Leitfähigkeit übten die Basalte noch heute einen erwärmenden Einfluß auf jene Schichten aus. Bischof[58]) hält es nicht für unmöglich, daß der Gryphitenkalk und vielleicht auch der darunter liegende Keuper von Klüften durchsetzt sind, und daß aufsteigende Wasserströme die Wärme dieser tieferen Schichten den darüberliegenden zuführen und so seit langen Zeiten einen erwärmenden Einfluß ausüben. Einer eingehenden Kritik sind die Beobachtungen bei Neuffen von Branco[59a]) unterzogen worden. Er zeigt zunächst, daß Mandelsloh bei der Berechnung der geothermischen Tiefenstufe sich nicht nur verrechnet hat, sondern auch eine unzulässige Art der Berechnung angewendet hat, zwei Umstände, durch die die Tiefenstufe zwar etwas größer wird, aber trotzdem noch den außerordentlich kleinen Wert von 11,1 m auf 1° C ergibt. Alle übrigen Fehler bewirken eher eine zu niedrige Temperaturangabe, als eine zu hohe. Die besten Beobachtungen sind die in den größeren Tiefen gemachten, und sie liefern eine geothermische Tiefenstufe von 10,46 m. Als Ursache jener abnorm raschen Temperaturzunahme nimmt Branco einen flachgelegenen, isolierten Schmelzherd unter jener ganzen Gegend an, der zugleich das Material für die dort so zahlreich vorhandenen Vulkandurchbrüche geliefert haben soll. In einer zweiten Abhandlung[59b]) wendet er sich gegen die von Höfer gegebene Erklärung, daß die angeblich durch das ganze Bohrloch verbreiteten bituminösen Liasschiefer die Ursache sein sollen,

Digitized by Google

indem er ausführt, daß einesteils diese Schiefer überhaupt die nur geringe Mächtigkeit von 30 Fuß 4 Zoll haben, andernteils aber nicht einmal in dieser Schicht ein Anwachsen der Temperatur stattfindet. Ebensowenig kann der Kohlenstoffgehalt der dunklen, allerdings sehr mächtigen Juratone zur Erklärung herangezogen werden, da sonst überall in diesen dunklen Tonen eine gleiche Wärmezunahme sich zeigen müsse, was nicht der Fall ist.

In die Zeiten des Mittelalters glaubt man sich versetzt, wenn man bei Humboldt[60]) I. S. 177 die Hypothese von Leslie[61]) (1829) liest, der aus der Zusammendrückbarkeit der Stoffe und aus der Gravitation auf ein hohles Erdinnere schließt. Er begründet seine Ansicht folgendermaßen. Infolge der nach dem Mittelpunkte zunehmenden Schwere werden die Stoffe mit wachsender Tiefe immer dichter. Es würde z. B. in einer Tiefe von 395 $^3/_5$ engl. Meilen die Luft 101 960 Billionen mal, Wasser 4,3492 mal und Marmor 3,8095 mal so dicht sein, als jeder der genannten Stoffe an der Erdoberfläche. Im Mittelpunkt wäre Marmor 119 mal, Wasser 3 009 000 mal so dicht als an der Oberfläche, und die Dichte der Luft ließe sich durch eine 169stellige Ziffer, von denen die drei ersten 764 sind, darstellen. Da nun die mittlere Erddichte nur 5 mal so dicht als Wasser ist, so muß die Erde innen hohl, jedoch nicht leer sein; vielmehr ist sie von einer sehr elastischen Masse, nämlich dem 640 Billionen mal elastischeren Licht erfüllt, das durch seine abstoßende Kraft zwar der Kompression entgegenwirkt, aber doch noch so konzentriert ist, daß der Hohlraum von blendendem Licht erfüllt ist (Emanationshypothese).

Humboldt selbst ist der Ansicht, das Erdinnere sei flüssig, wie aus folgendem hervorgeht: Im I. Bande S. 26, 27 sagt er, daß man sich ohne die Annahme, die Wärme nehme nach dem Innern zu (5 g. Meilen unter der Oberfläche sei es so heiß, daß Granit schmelze), vieles über Vulkane und Erdbeben nicht erklären könne. Sicher folge aus den Temperaturbeobachtungen in Bohrlöchern, Bergwerken und aus den Vulkanausbrüchen, daß bis zu beträchtlichen Tiefen die Temperatur zunehme, und nach Analogieschlüssen sei diese Zunahme auch bis zum Zentrum sehr wahrscheinlich (S. 179). „Der Kern der Erde wird als in feurig-flüssigem Zustand gedacht" (IV, S. 217). „Ist das Erdinnere flüssig, wie im allgemeinen nicht zu bezweifeln ist, da trotz des ungeheuren Druckes die Teilchen doch verschiebbar bleiben, so sind in dem Erdinnern dieselben Bedingungen enthalten, welche an der Erdoberfläche die Flut des Weltmeeres erzeugen." (S. 488.) „Die fluterregende Kraft wird um so geringer werden, je näher man sich dem Mittelpunkt befindet." „Wenn die feste Erdrinde

Digitized by Google

diesem Bestreben einen Widerstand entgegensetzt, so wird das Erdinnere an diesen Stellen nur einen Druck gegen die Erdrinde ausüben." Aus dem Schmelzpunkt der Gesteine und aus der Wärmezunahme schließt Humboldt auf eine Krustendicke von 5,4 g. Meilen.

Eine viel dickere Kruste fordert Belli[58]) S. 38, der eine Krustendicke von über 30 ital. Meilen (69 km) annimmt. Die äußere Schale kann sich infolge des ungeheuren Druckes, der alle Materialien zerquetscht, nicht wie ein Gewölbe selbst tragen, sondern sie ruht auf dem flüssigen Kern. Durch einsinkende Krustenteile werden die flüssigen Massen teilweise in die Höhe gepreßt und kommen als Lava zu Tage.

Auf Grund seiner Beobachtungen über die Störungen der magnetischen Kurven kommt Lamont[62]) (1855) zu dem Schluß, daß diese dadurch entstehen, daß an einzelnen Stellen der Magnetismus (auf unserer Halbkugel südlicher) stärker hervortritt. Dies sucht er dadurch zu erklären, daß er den Erdkern als eine kompakte Masse annimmt, die von der Oberfläche nicht etwa nur durch stärkere Kompression, sondern auch durch ihre Zusammensetzung verschieden ist. Der Kern ist metallisch, oder von vielen Adern von Eisen und andern Metallen durchzogen zu denken. Er fügt aber nochmals hinzu: „Kompaktheit bleibt aber immerhin eine notwendige Bedingung." Die Kernoberfläche ist nun nicht etwa glatt vorzustellen, sondern sie hat ebenso wie die Erdoberfäche Berge, die sich uns durch stärkeren Magnetismus verraten. Er faßt dies so zusammen: „Die Erde besteht aus einem kugelförmigen, kompakten, magnetischen Kern mit mehr oder minder beträchtlichen Erhöhungen, dann aus einem dünnen Überzuge von lockerem Gefüge, größeren und kleineren Felsenstücken und fein zerteilten Substanzen, deren nähere Charakterisierung in den Bereich der Geologie gehört." Eine Karte der magnetischen Kurven wird also, da die Unregelmäßigkeiten durch die Erhöhungen des Kerns bedingt sind, zugleich die Unregelmäßigkeiten der Kernoberfläche darstellen, die mit denen der Erdoberfläche nicht übereinzustimmen brauchen. Nimmt man an, der Erdkern habe einst nicht überall dieselbe Temperatur gehabt, so müssen sich solche Temperaturdifferenzen infolge der guten Wärmeleitung der Metalle ausgeglichen haben, sodaß er jetzt überall dieselbe Temperatur hat. In den magnetischen Störungsbezirken, wo der heiße Kern der Oberfläche näher kommt, muß sich eine größere Bodenwärme zeigen, die sich z. B. an der Vegetation äußert. Der Verfasser glaubt, in Bayern auch wirklich eine Übereinstimmung gefunden zu haben, wodurch die von Brewster und Muncke schon lange wahrgenommene Ähnlichkeit zwischen den magnetischen und Temperaturkurven eine Begründung erfahren würde.

Digitized by Google

Naumann[40]) widmet in seinem Lehrbuch der Geognosie das 3. Kapitel (S. 36—65) der Frage über die Temperatur und den Zustand des Erdinnern. Er verlegt die Fläche konstanter Temperatur in der gemäßigten Zone in 60—80 Fuß Tiefe, während sie in den Äquatorialgegenden viel höher liegt. „In jeder größeren Tiefe herrscht gleichfalls eine konstante Temperatur, welche jedoch mit der Tiefe zunimmt und sich als um so höher erweist, je größer die Tiefe ist." Als Beweis für diese Behauptung gibt er die Thermalquellen und die artesischen Brunnen an, wovon besonders die letzten zu Beobachtungen geeignet seien, da man bei ihnen auch die Tiefe messen und daraus das Gesetz für die Temperaturzunahme ableiten könne. Außer den schon genannten Temperaturbeobachtungen führt Naumann noch folgende an:

Bohrbrunnen von La Grenelle in Paris		Bohrbrunnen von Neusalzwerk in Westfalen	
Tiefe in Pariser Fuß	Temperatur in C°	Tiefe in Pariser Fuß	Temperatur in C°
917	22,2	580	19,7
1231	23,75	1285	27,5
1555	26,43	1935	31,4
1684	27,70	2144	33,6

In einem artesischen Brunnen in Mondorff in Luxemburg fand man in 2066 Fuß Tiefe 34° C. (Vergleiche auch [68]).) Unter der Voraussetzung, daß wenigstens in den uns erreichbaren Tiefen die Temperatur wie die Tiefe zunimmt, ergeben sich daraus folgende geothermische Tiefenstufen für 1° C.

Bei Neuzalzwerk: . . . . . 92,27 Fuß
„ Grenelle: . . . . . 95,0 „
„ Mondorff: . . . . . 91,1 „

Ferner fand man:

Bei St. André (Eure.): . . . 95,3 Fuß
„ Rouen: . . . . . 90,8 „

Von diesen ziemlich gut übereinstimmenden Beobachtungen weichen die folgenden bedeutend ab:

Pitzbuhl b. Magdeburg 80 Fuß (457 F. Gesamttiefe)
Artern in Thüringen 120 Fuß (1000 F. Gesamttiefe).

Naumann geht dann auf die Beobachtungen in Gruben ein, wobei er sich der Ansicht von Bischof ganz anschließt, daß sie nur dazu dienen können, die Temperaturzunahme nach dem Innern zu bestätigen, daß sie jedoch infolge der vielen störenden Einflüsse zur Bestimmung der geothermischen Tiefenstufen ungeeignet sind. Hierauf sucht er die Verschiedenheit bei den einzelnen geothermischen

Digitized by Google

Tiefenstufen zu erklären und behauptet, daß das verschiedene Wärmeleitungsvermögen der Gesteine und die Reliefform des Landes den größten Einfluß haben. Die geringe Tiefenstufe der Kohlenbergwerke sei eine Folge der dort seit altersher stattfindenden Zersetzung der Pflanzen. Ferner sei — eine Ansicht, die auch Cordier vertritt — der Sitz der inneren Erdwärme nicht überall in der gleichen Tiefe zu suchen, sondern der Oberfläche bald näher bald ferner, was natürlich auch eine verschiedene Wärmezunahme bedingen müsse. Während man gewöhnlich annimmt, die Temperatur nehme wie die Tiefe, also in einer arithmetischen Reihe, zu, glaubt Naumann, dies treffe nur für die obersten Schichten zu, und hernach sei die Zunahme eine langsamere. Ja, er glaubt sogar trotz der geringen Tiefe, bis zu der unsere Beobachtungen reichen, aus ihnen den Beweis für diese Ansicht erbringen zu können. Er berechnet aus den Beobachtungen von La Grenelle für die ersten 677 Fuß eine geothermische Tiefenstufe von 81,6 Fuß, für die folgenden 792 Fuß eine solche von 123 Fuß; ferner führt er noch die oben erwähnten Beobachtungen im Scherginschachte und die von Bischof an seinen Basaltkugeln zur Bestätigung an.

Aus alledem schließt er auf ein feurigflüssiges Erdinnere, wobei er jedoch ausdrücklich hervorhebt, daß die Wärme nur bis zu der Schmelztemperatur zunimmt, die dem in jener Tiefe vorhandenen Drucke entspricht; innerhalb der flüssigen Massen wird infolge der auftretenden Konvektionsströme die Temperatur ziemlich konstant sein. Zu der oben erwähnten Hypothese von de la Rive und Lyell bemerkt Naumann, daß er zwar das Vorhandensein elektrischer Ströme und dadurch bedingter chemischer Prozesse nicht leugne, daß aber in den uns erreichbaren Tiefen nicht so intensive und allgemein verbreitete chemische Prozesse vor sich gehen, die eine solche Wärme erklären könnten; ferner wäre auch die Ursache solch intensiver elektrischer Ströme nachzuweisen. Die beiden Forscher hätten also an Stelle der Zentralfeuerhypothese nur eine kompliziertere, ebensowenig bewiesene gesetzt. Zum Schluß gibt er noch eine Übersicht über die von den einzelnen Forschern angenommene Krustendicke. Außer der schon erwähnten Arbeit von Hopkins, der eine Kruste von 172—215 geogr. Meilen fordert, führt Naumann noch die Annahme von Cordier an. Dieser berechnet, unter der Voraussetzung einer arithmetischen Temperaturzunahme und ohne Rücksicht auf die Druckverhältnisse, aus seinen Beobachtungen zu Carmeaux, Littry und Decise eine mittlere Dicke von mindestens 14 geographischen Meilen.

Digitized by Google

Der Vollständigkeit halber möge auch noch Studers[64]) Lehrbuch der physikalischen Geographie und Geologie erwähnt werden, auf dessen Inhalt wir jedoch nicht näher einzugehen brauchen, da er außer den bereits erwähnten Arbeiten nichts Neues bringt und seine Ansicht mit der von Naumann übereinstimmt.

In gleicher Weise wie Hopkins hat auch Lord Kelvin (W. Thomson[65, 66]), S. 405—407, aus den Erscheinungen der kosmischen Physik einen Schluß auf den Zustand des Erdinnern zu ziehen gesucht. Er geht von der Überlegung aus, daß die Anziehung von Sonne und Mond nicht nur auf die Wassermassen der Erdoberfläche einen Einfluß ausübt, sondern auch auf die feste Erdrinde. Die Wirkung dieser attraktiven Kräfte, die man bei den Meeren schon lange unter dem Namen der Gezeiten kennt, ist bei der festen Erde um so größer, je geringer die Krustendicke und je geringer die Starrheit der ganzen Erdmasse ist. Da keine Substanz absolut starr ist, so muß die Erdoberfläche bis zu einem gewissen Grade diesen Kräften nachgeben. Daß es bis jetzt nicht gelungen ist, diese Deformationen der festen Erdrinde nachzuweisen, ist kein Beweis gegen ihre Existenz, wohl aber ein Beweis gegen die Annahme, die Erde bestehe aus einer dünnen Kruste mit einem flüssigen Innern; denn dann würde von Ebbe und Flut des Meeres nichts zu merken sein, sondern Land und Wasser würden sich gleichzeitig alle 12 Stunden um einige Fuß heben und senken. Selbst wenn die Starrheit der Erde gleich der des Glases oder Stahls wäre, so würde sie doch noch $^3/_5$ beziehungsweise $^1/_3$ mal soviel nachgeben, als wenn sie flüssig wäre, und die Fluthöhe würde nur $^2/_5$ beziehungsweise $^2/_3$ des Wertes erreichen, den sie bei einer absolut starren Erde haben würde. Es ist daher sehr wahrscheinlich, daß die Starrheit der Erde größer als die des Glases ist (S. 418). Die Starrheit der Erde beeinflußt aber nicht nur die Fluthöhe, sondern auch die Größe der Präzession und Nutation sind von ihr abhängig, und zwar stimmt hier die Berechnung mit der Beobachtung unter der Annahme einer absoluten Starrheit so gut überein, daß auch hieraus ein nur geringes Nachgeben der festen Erdkruste folgt (S. 421).

Ein absoluter Beweis ist dies aber nicht, denn bei einer flüssigen, mit einer dünnen Kruste überzogenen Erdmasse treten zwei Wirkungen auf, welche die Präzession in entgegengesetzter Weise beeinflussen. Präzession und Nutation werden einesteils durch das leichte Nachgeben der Schale verkleinert, andernteils aber auch vergrößert, da das Trägheitsmoment einer im Innern flüssigen Erde kleiner ist, als das einer ganz festen. „Es scheint äußerst unwahrscheinlich zu

Digitized by Google

sein, daß die Größe, um welche das Trägheitsmoment wegen der im Innern enthaltenen Flüssigkeit kleiner ist, zum ganzen Trägheitsmoment näherungsweise in demselben Verhältnisse stehen sollte, wie das wirklich stattfindende elastische Nachgeben zu dem vollkommen leichten Nachgeben, welches eintreten würde, wenn die Erde ganz flüssig wäre" (S. 422).

Auch aus der Abkühlung der einst flüssigen Erdmasse sucht Thomson ihre Starrheit zu beweisen (S. 434—453). Aus der überall mit wachsender Tiefe zunehmenden Temperatur schließt er auf einen Wärmeverlust der Erde. „Möglicherweise ist die Wirkung dieses Verlustes keine Abkühlung, sondern nur ein Verbrauch der potentiellen Energie, welche in diesem Falle kaum etwas anderes sein könnte, als die chemische Verwandtschaft zwischen den die Erdmasse bildenden Substanzen. Es unterliegt aber keinem Zweifel, daß die Erde im ganzen entweder von Jahr zu Jahr kälter wird, oder daß sich die Wärme, die sie verliert, in ihrem Innern durch temporäre dynamische (d. h. in diesem Falle chemische) Wirkung wieder erzeugt." Thomson gibt zwar zu, daß es nicht unmöglich ist, die Temperaturverhältnisse des Erdinnern durch chemische Prozesse zu erklären; er hält jedoch diese Erklärung infolge der überall gleichmäßig beobachteten Temperaturzunahme für sehr unwahrscheinlich. „Doch ist beim gegenwärtigen Standpunkt der Wissenschaft offenbar die weniger hypothetische Ansicht vorzuziehen, nach welcher die Erde nichts als ein chemisch untätiger, in der Abkühlung begriffener warmer Körper ist." Direkt unhaltbar sei die Poissonsche Hypothese, wenn man bedenkt, daß die Entwicklung der Tier- und Pflanzenwelt beim Passieren der heißen Regionen des Weltenraumes keine Unterbrechung erlitten hat. Ist nämlich dieser Durchgang vor mehr als 1250 und weniger als 5000 Jahren erfolgt, so muß die Temperatur jener heißeren Region des Weltenraumes 25—50° F. höher gewesen sein, als die mittlere heutige Oberflächentemperatur, eine Tatsache, die durch die Geschichte widerlegt wird. Nimmt man dagegen an, daß dieser Durchgang durch eine heißere Region des Weltenraumes vor 20 000 oder noch mehr Jahren stattfand, so müßte seine Temperatur gar 100° F. und mehr über der jetzigen Oberflächentemperatur gewesen sein, dann wären aber alle Lebewesen zu Grunde gegangen. Thomson wendet sich weiter auch der Leibnizschen Theorie zu und findet, daß die Erstarrung der flüssigen Erdmasse vor 200 Millionen Jahren erfolgt sei, wenn man den Schmelzpunkt = 10 000° F. setzt, vor 98 Millionen Jahren, wenn der Schmelzpunkt nur 7000° F. ist. Um die Grenzwerte für die seit der Erstarrung der Erdkruste

Digitized by Google

vergangene Zeit zu bestimmen, macht Thomson eine Anwendung einer von Fourier für einen allgemeinen Fall aufgestellten Gleichung für die Erde. Fourier berechnet die Änderung der Temperatur und die Temperatur eines Punktes in einem festen, nach allen Richtungen unendlich ausgedehnten Körper unter der Voraussetzung, daß zu einer Anfangszeit zu beiden Seiten einer gewissen unendlich großen Ebene zwei verschiedene konstante Werte vorhanden sind und erhält die Gleichungen

$$\frac{dv}{dx} = \frac{V}{\sqrt{\pi k t}} \cdot e^{-\frac{x^2}{4kt}}$$

$$v = v_0 + \frac{2V}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{kt}}} dz\, e^{-z^2};$$

„darin bezeichnen

k das durch die Wärmekapazität der Masseneinheit ausgedrückte Leitungsvermögen des festen Körpers;

V die halbe Differenz der beiden anfänglichen Temperaturen;

v_0 das arithmetische Mittel dieser Temperaturen;

t die Zeit;

x den Abstand irgend eines Punktes von der Mittelebene;

v die Temperatur des Punktes x zur Zeit t, und folglich

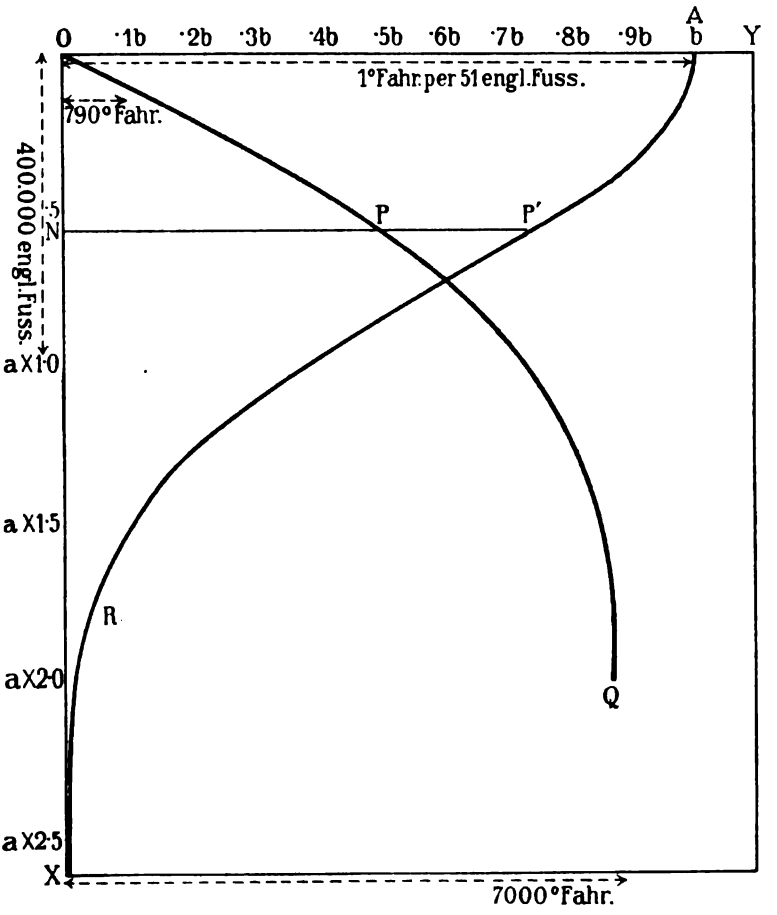
$\frac{dv}{dx}$ (nach der Bezeichnung der Differentialrechnung) die für die Längeneinheit senkrecht zu den isothermalen Ebenen genommene Größe der Variation der Temperatur."

Thomson hat nun nachgewiesen, daß sich diese Gleichungen mit hinreichender Genauigkeit auf die Erde anwenden lassen, und er findet als unteren Grenzwert für die Abkühlungsdauer 20 Millionen Jahre und als oberen 400 Millionen Jahre. Gleichzeitig benutzt er die Gleichung $\frac{dv}{dx}$, um die Verteilung der Temperatur in der Erde 100 Millionen Jahre nach Beginn der Abkühlung zu berechnen und graphisch darzustellen. Es ergibt sich, wenn man V = 7000° F. setzt, daß die Temperatur für die ersten 100 000 Fuß ungefähr um $^1/_{51}$° F. für einen Fuß zunimmt, worauf die Zunahme eine viel geringere ist; bei 400 000 Fuß ungefähr $^1/_{141}$° F. bei 800 000 Fuß weniger als $^1/_{2550}$° F. Unter den gleichen Voraussetzungen findet er als Temperaturzunahme:

40 000	Jahre	nach	Beginn	der	Abkühlung	1°	F	für	1	Fuß
160 000	„	„	„	„	„	$^1/_2$°	„	„	1	„
4 000 000	„	„	„	„	„	$^1/_{10}$°	„	„	1	„
100 000 000	„	„	„	„	„	$^1/_{50}$°	„	„	1	„

Digitized by Google

$t = 100$ Millionen $\quad \frac{dv}{dx} = \frac{V}{354\,000} e^{-\frac{x^2}{160\,000\,000\,000}}$
$k = 400$



Für die Kurve AP'R ist $b = \frac{V}{354\,000}$; ist $V = 7000°$ F, so ist $b = \frac{1}{50{,}6}$

Für die Kurve OPQ ist $b = \frac{V}{\frac{1}{2}\sqrt{\pi}}$; ist $V = 7000°$ F, so ist $b = 7\,900°$

Die Kurve OPQ zeigt den Überschuß der Temperatur über die der Oberfläche.

Die Kurve AP'R zeigt die Größe der Temperaturzunahme nach dem Mittelpunkt der Erde zu.

Daraus folgt mit einiger Wahrscheinlichkeit, daß 100 Millionen Jahre seit dem Beginn der Abkühlung der Erde verstrichen sind. Zum Schluß geht Thomson noch auf die erwähnten Versuche von Bischof ein über die Kontraktion von Gesteinsmassen im Momente der Erstarrung und schließt daraus, daß die sich bildende Kruste

Digitized by Google

infolge ihres höheren spezifischen Gewichts nach dem Erdinnern sinken müsse, wo die einzelnen Schollen ein Skelett bilden. Dieses wiederholt sich solange, bis das Skelett groß genug ist, um die Kruste zu tragen. Zwischen den Schollen befinden sich aber noch flüssige Massen, die wegen ihrer größeren Leichtigkeit das Bestreben haben, in die Höhe zu dringen. Das Zusammenbrechen von einzelnen Krustenteilen und das Hervordringen von Lava ist nach Thomson die Ursache der Erdbeben und vulkanischen Erscheinungen.

Im Gegensatz zu dieser und der oben erwähnten Hopkinschen Hypothese nimmt Poulett Scrope[67]) nicht einzelne Lavaseen, sondern eine zusammenhängende Schicht flüssigen Materials an, das sich zwischen der festen Kruste und dem durch Druck verfestigten Kern befindet, und von dem aus die einzelnen Reservoirs der Vulkane gespeist werden. Gegen ein festes Erdinnere spricht sich Delaunay[68]) aus, der zunächst die Hypothese von Hopkins und Thomson kurz angibt und dann etwa folgendes darauf erwidert: Wenn wir mechanische Probleme in der Natur behandeln, so kann dies immer nur mit einer gewissen Annäherung an die Wirklichkeit geschehen; wir müssen die uns gestellten Aufgaben vereinfachen, um sie überhaupt der mathematischen Behandlung zugänglich zu machen. So nimmt man z. B. feste Körper als absolut fest, flüssige als absolut flüssig an, obgleich keins von beiden in der Natur wirklich vorkommt. Dabei dürfen wir aber nie aus dem Auge verlieren, wie weit eine solche Abstraktion von der Wirklichkeit auf das erhaltene Resultat von Einfluß ist. Er führt als Beispiel einen mit Wasser gefüllten runden Ballon an, der in Rotation versetzt wird. Unter der Voraussetzung der absoluten Flüssigkeit für Wasser dürfte es an der Rotation nicht mit teilnehmen. In Wirklichkeit tut es dies aber nur bei schneller Umdrehung, während bei langsamer Bewegung das Gefäß und die Flüssigkeit zusammen rotieren, als wenn sie eins wären. Wendet man dies auf die Erde an, indem man voraussetzt, sie bestehe aus einer dünnen Kruste mit einem flüssigen Innern, so würden, wenn keine Präzession und Nutation vorhanden wären, beide wie eine feste Masse um die Achse rotieren. Sollten etwa kleine Unterschiede in der Bewegung von Kruste und Innerem vorhanden gewesen sein, so hätten sie sich infolge der Reibung längst ausgeglichen. Die außerordentlich langsame Änderung in der Bewegung, welche Präzession und Nutation auf die Erdachse hervorbringen, kombiniert sich mit der Rotationsbewegung, und Delaunay hält es für ganz unzweifelhaft, daß das flüssige Innere mit der festen Kruste dieser Bewegung wie eine feste Masse folge, zumal da die flüssigen Massen infolge des hohen

Digitized by Google

Drucks sehr zähe sein werden. Wirken aber Präzession und Nutation auf die Kruste und das flüssige Innere gleichzeitig, so ist es unmöglich, aus diesen Erscheinungen einen Schluß auf die Dicke der Kruste zu ziehen.

Den Abschluß des ersten Teils der vorliegenden Arbeit, der die älteren Hypothesen über Temperatur und Zustand des Erdinnern behandelt, möge die Hypothese des Amerikaners Sterry Hunt[69]) (1868) bilden, der die Erdwärme und die damit zusammenhängenden Vorgänge auf chemischem Wege zu erklären sucht (nach [53]) S. 42). Er geht von einer kugelförmigen, rotierenden Nebelmasse aus, die eine so hohe Temperatur hatte, daß alle Stoffe gasförmig und vollständig dissoziiert waren. Bei der Abkühlung trat eine Zirkulation ein, die Kugel wurde flüssig, und nun konnten sich auch die ersten chemischen Verbindungen bilden, die nach Hunts Ansicht Oxyde von Silicium, Aluminium, Calcium, Magnesium und Eisen waren. Die Erstarrung begann im Zentrum, während die Oberfläche noch flüssig war. Diese kühlte sich nun langsam ab, und unter dem Druck der Atmosphäre, der damals siebenmal so groß war als heute, begannen die chemischen Kräfte im gewaltigsten Umfange zu wirken. Zuerst bildete sich ein Brei, ähnlich den Hochofenschlacken oder vulkanischen Gläsern, aus allen den Stoffen, die in Dampfform nicht mehr bestehen konnten. Als dann die Abkühlung soweit vorgeschritten war, daß die Oberfläche dieses Breies erstarrte, kondensierte sich auch bald der Wasserdampf und zwar infolge des größeren Druckes schon bei einer viel höheren Temperatur. Das erste Wasser hatte große Mengen Schwefel- und Salzsäure absorbiert und zerstörte daher sofort einen großen Teil der soeben erst gebildeten Kruste. Auch die in großen Massen vorhandene Kohlensäure begann jetzt auf die Gesteine einzuwirken und wurde in großen Mengen gebunden. Die Erdkruste bestand also aus Schichten, die aus dem Schmelzfluß erstarrt, dann aber durch chemische Einflüsse verändert waren. Je dicker die Kruste wurde, um so mehr kamen die untersten, mit Wasser durchtränkten Schichten in den Bereich der inneren Hitze, und um so größer war der darauf lastende Druck. Sie wurden dadurch in den sogenannten „wässrigen Schmelzfluß" gebracht und liefern das Material für die Vulkanausbrüche. Toula[53]) (S. 44) bemerkt zu dieser Hypothese, daß zwar nicht zu leugnen ist, daß chemische Vorgänge in der Erde seit alters her stattgefunden haben, aber der von Hunt eingeschlagene Weg erscheint ihm höchst zweifelhaft. Sowohl der Ursprung der gewaltigen Sedimentmassen, als auch die Kräfte, die das Sinken dieser Massen bewirken, sind keineswegs nachgewiesen.

Digitized by Google

Es ist auch nicht einzusehen, warum die einsinkenden Sedimente durch die innere Erdwärme schmelzen sollen, während die in jenen und noch größeren Tiefen befindlichen Massen sich im festen und nicht im flüssigen Zustande befinden.

Zusammenfassung der wichtigsten Resultate bis zum Jahre 1870.

Überblicken wir das Gesagte noch einmal, so entrollt sich folgendes Bild vor unsern Augen. In den ältesten Zeiten dachte man sich das Erdinnere als eine große feurig-flüssige Masse. Kircher war der erste, der eine Temperaturzunahme mit wachsender Tiefe feststellte, und Cordier bestimmte den ersten genaueren Temperaturgradient zu 25 m auf 1° R. Während man seit Deskartes meistens annimmt, daß die ganze Erde einst geschmolzen war, und daß die innere Erdwärme nur noch ein Rest jener sehr großen Hitze ist, glaubt Aepinus, die Erde sei bei ihrer Entstehung kalt gewesen und erst nachträglich erwärmt worden. Eine ähnliche Ansicht finden wir später bei Poisson wieder, nur mit dem Unterschiede, daß er die innere Erdwärme nicht von der Sonne, sondern von der Temperatur des von unserem Sonnensystem durchlaufenen Weltraumes abhängig sein läßt. Die Unabhängigkeit der inneren Erdwärme von der Sonne wurde schon gegen Ende des 18. Jahrhunderts durch die Beobachtungen von Cassini und De la Hire im Keller der Pariser Sternwarte festgestellt. Ein dritter Weg, die innere Erdwärme zu erklären, wurde zuerst von De la Rive und Lyell, später von Sterry Hunt eingeschlagen, indem die genannten Forscher chemische Prozesse als die Ursache der Temperaturzunahme ansehen. Gegen Ende des 17. Jahrhunderts stellte Halley die Hypothese auf, das Erdinnere sei hohl; gleicher Ansicht waren später Franklin, Lichtenberg und Leslie. Diese Arbeiten bilden die Vorläufer der im zweiten Teile noch näher zu besprechenden Hypothese von dem gasförmigen Erdinnern. Für ein festes Erdinnere trat zuerst Marschall von Bieberstein ein, der die Erde als festes Agglomerat von Meteoriten ansah. Lamont schließt aus den Störungen der magnetischen Kurven auf einen kompakten Eisenkern. Am eingehendsten hat Thomson die Festigkeit der zentralen Erdpartien zu begründen versucht. Er stützt seinen Beweis einerseits auf die Beobachtungen der Präzession und Nutation, andererseits auf die Experimente von Bischof, der nachwies, daß sich die Silikate bei der Kristallisation zusammenziehen. Daraus schließt er aber fälschlicherweise, daß die an der Erdoberfläche erkalteten Teile bis zum Zentrum

Digitized by Google

einsinken, und daß von hier aus die Erstarrung vor sich gegangen sei. Poulett Scrope hält die Starrheit nur für eine bedingte, die beim Aufheben des Druckes auch sofort wieder aufgehoben wird. Alle übrigen Forscher wie Newton, Leibniz, Fourier, Naumann, Delaunay sind der Ansicht, das Erdinnere sei flüssig und mit einer mehr oder weniger dicken Kruste umgeben. Das Erdalter zu bestimmen, versucht nur die Berechnung von Thomson, die als Grenzwerte 20 und 400 Millionen Jahre und als wahrscheinlichsten Wert 100 Millionen Jahre ergibt. Für die mittlere Dichte der Erde findet Schmidt aus allen Beobachtungen den Wert 4,785. Die Werte für die geothermische Tiefenstufe sind allzusehr voneinander verschieden, als daß sich ein Mittelwert angeben ließe, und ich will dies daher erst im zweiten Abschnitt tun, wenn mir die neueren, fehlerfreien Beobachtungen zur Verfügung stehen; gleichfalls werde ich auch ein abschließendes Urteil, soweit ein solches überhaupt möglich ist, welche Hypothese über die Temperatur und den Zustand des Erdinnern nach dem heutigen Standpunkt der Wissenschaft die wahrscheinlichste ist, bis ans Ende der vorliegenden Arbeit verschieben, da ich sonst vieles wiederholen müßte, und da mir auch erst dann die neuesten Resultate der Mathematik und Naturwissenschaften zu Gebote stehen.

— — —

II.

Die Hypothesen vom Jahre 1870 bis in die Gegenwart.

Im zweiten Teile der vorliegenden Arbeit halte ich es der besseren Übersicht wegen für geraten, die chronologische Reihenfolge in der Aufzählung nur noch insoweit beizubehalten, als ich die zusammengehörigen Hypothesen der Zeit ihrer Veröffentlichung nach anführe. Zunächst will ich mich mit den Arbeiten befassen, die uns über die stoffliche Zusammensetzung der Erde Aufschluß geben.

1. Zusammensetzung der Erdkruste.

Der direkten Beobachtung ist nur ein verschwindend kleiner Teil der Erdoberfläche zugänglich; mit einiger Genauigkeit läßt sich die Zusammensetzung der festen Kruste bis zu einer Tiefe von 10 km angeben. Eine derartige Berechnung wurde von Clarke[70]) mit folgendem Resultate durchgeführt:

Digitized by Google

SiO_2	59,87 %	P_2O_5	0,26 %
Al_2O_3	15,02	S	0,11
Fe_2O_3	2,58	Cl	0,07
FeO	3,40	F	0,02
MgO	4,06	BaO	0,11
CaO	4,79	SrO	0,04
Na_2O	3,39	MnO	0,10
K_2O	2,93	NiO	0,03
H_2O	1,86	Cr_2O_3	0,05
TiO_2	0,72	V_2O_3	0,03
ZrO_2	0,03	Li_2O	0,01
CO_2	0,52		

Läßt man die weniger wichtigen Bestandteile weg, so ergibt sich:

SiO_2	60,48 %	Na_2O	3,43 %
Al_2O_3	15,17	K_2O	2,96
Fe_2O_3	2,61	H_2O	1,49
FeO	3,44	TiO_2	0,72
MgO	4,10	P_2O_5	0,26
CaO	4,84	MnO	0,10

Diese Analyse entpricht etwa der Zusammensetzung eines Syenits oder Diorits.

2. Die mittlere Erddichte.

Über alle Stoffe jenseits dieser obersten 10 km müssen wir auf Umwegen einen Aufschluß zu erlangen suchen, wobei uns zunächst die Beobachtungen über die mittlere Erddichte behilflich sein werden. Außer den schon erwähnten Beobachtungen von Maskelyne, Hutton, Carlini und Cavendish sind noch folgende zu nennen:

James[71]) wiederholte die Messungen von Maskelyne und Hutton und erhielt $\Delta = 5{,}316 \pm 0{,}054$; Mendenhall[72]) S. 11, [73]) beobachtete ebenso wie Carlini die Schwingungsdauer eines Pendels, und zwar das eine Mal in Tokio und hierauf auf dem Gipfel des Fujiyama und fand als mittlere Erddichte $\Delta = 5{,}77$ *). Eine andere Methode ist von Airy[72]) S. 13, [74, 75]) vorgeschlagen worden, der die Schwingungsdauer eines Pendels an der Erdoberfläche und in dem 1256 engl. Fuß tiefen Schacht der Kohlengrube von Harton beobachtete, wobei sich $\Delta = 6{,}566 \pm 0{,}0182$ ergab. Haughton[72]) S. 17 [76]) berechnete die Airyschen Resultate auf andere Art und erhielt $\Delta = 5{,}48$. Auf gleiche Weise fand v. Sterneck[72]) S. 17, [77]) X. 1884 S. 4 in dem 1000 m tiefen Adalbertschacht zu Přibram in Böhmen $\Delta = 5{,}77$, was Helmert[78]) S. 499 und 500 auf 5,71 korrigierte. Alle diese Bestimmungen mit dem Pendel haben den Nachteil, daß man zur Berechnung von Δ die Masse und Dichtigkeit eines

*) Nach Fresdorf ist in der Berechnung ein Fehler; seine Berechnung ergibt $\Delta = 5{,}667$.

Digitized by Google

Berges oder einer Erdschicht benutzen muß, die man doch trotz aller Sorgfalt nicht genau ermitteln kann. Vorteilhafter, da von diesen zwei Größen unabhängig, sind daher die bereits erwähnten Bestimmungen von Cavendish mit der Drehwage, die nach einigen Verbesserungen am Apparat von Reich [72] S. 20 [79]), Baily [72]) S. 23 und Cornu-Baille [72]) S. 23 [80]) wiederholt wurden (Resultate siehe in der folgenden Tabelle). Jolly [72]) S. 24, [81]) benutzte die Wage, um die Größe von Δ zu ermitteln. Er hängte eine sehr empfindliche Wage in einem Turme der Universität München auf. An jeder der Wagschalen befand sich ein 21 m langer Messingdraht, der selbst wieder je eine Wagschale trug. Als Belastung dienten vier Glaskolben von gleichem Gewicht und Volumen, von denen zwei mit der gleichen Menge Quecksilber gefüllt wurden. Er bestimmte nun zunächst die Gewichtszunahme, die eintrat, wenn auf der einen Seite der Kolben mit dem Quecksilber unten lag und der leere oben, und dann brachte er auf dieser Seite noch eine große Bleikugel darunter und bestimmte die weitere Zunahme. Aus dieser Zunahme und den übrigen bekannten Größen ergibt sich $\Delta = 5{,}692 \pm 0{,}068$. Gleichzeitig wurden von Poynting [72]) S. 25, [82]) Versuche ausgeführt derart, daß er an einem Arm einer Wage eine Bleikugel aufhing, die mit der Schale am andern Arm durch Gewichte ins Gleichgewicht gebracht wurde. Er beobachtete dann die Ablenkung der Wage, die eine der Bleikugel genäherte zweite Bleikugel hervorbrachte und berechnete daraus $\Delta = 5{,}69 \pm 0{,}15$. 12 Jahre später wiederholte Poynting nach Anbringung einiger Verbesserungen seine Versuche und fand $\Delta = 5{,}4934$. Eine weitere Vervollkommnung der Wägungsmethode wurde von König und Richarz [72]) S. 26, [83]) und später von Richarz und Krigar-Menzel [84]) vorgenommen. Sie brachten die Wage möglichst nahe über einem parallelopipedischen Bleiklotz an, der unter jeder Schale senkrecht durchbohrt war. Durch diese zwei Löcher führen zwei Stangen, die an ihrem oberen Ende an je einer Wagschale befestigt sind und am unteren Ende zwei weitere Schalen tragen. Auf diese Weise war eine viel größere Genauigkeit zu erreichen, einerseits infolge der günstigeren Anordnung der Bleimassen und andererseits infolge der geringeren Dimensionen des ganzen Apparates, was manche Fehlerquelle beseitigte. Das Resultat ihrer Beobachtungen ist $\Delta = 5{,}505 \pm 0{,}009$. Zum Schlusse möge noch die Wilsingsche [72]) S. 28, [85]) Pendelmethode erwähnt werden. An den Enden eines 1 m langen Messingrohres befindet sich je eine etwa 0,5 kg schwere Kugel. In der Mitte des Rohres ist eine Achatschneide befestigt, die in einem Lager aus demselben Material ruht. Die Ablenkung

Digitized by Google

wird durch zwei gußeiserne, je 325 kg schwere Zylinder bewirkt, die übers Kreuz so vor die Kugeln gebracht werden, daß die Mittelpunkte der Kugeln in der Verlängerung der Zylinderachsen liegen. Die ersten Versuche ergaben $\Delta = 5{,}594 \pm 0{,}032$. Zwei Jahre später wiederholte Wilsing [72]) S. 29 seine Versuche und erhielt den ziemlich gut mit dem ersten übereinstimmenden Wert $5{,}577 \pm 0{,}013$. Die Methode von Berget [72]) S. 29 ist allzusehr von der Temperatur abhängig, um genaue Resultate liefern zu können, und ich will mich daher mit den angeführten Bestimmungen begnügen und ihre Resultate in einer Tabelle zusammenfassen.

Maskelyne u. Hutton	1775—1778	4,48 4,95
Playfaire	1811	4,713
James	1856	$5{,}316 \pm 0{,}054$
Carlini	1824	4,39
nach Schmidt		4,837
Mendenhall	1881	5,77
nach Fresdorf		5,667
Airy	1856	$6{,}566 \pm 0{,}0182$
Haughton	1856	5,48
Sterneck	1883	5,77
nach Helmert		5,71
Cavendish	1798	5,48
Reich	1838	$5{,}48 \pm 0{,}0233$
	1850	5,583
Baily	1843	5,66
berichtigt		5,55
Cornu-Baille . . .	1873	5,56
Jolly	1880	$5{,}692 \pm 0{,}068$
Poynting	1878	$5{,}69 \pm 0{,}15$
	1891	5,4934
Richarz, Krigar-Menzel	1896	$5{,}505 \pm 0{,}009$
Wilsing	1887	$5{,}594 \pm 0{,}032$
	1889	$5{,}577 \pm 0{,}013$

Berücksichtigen wir nur die Ergebnisse der neueren, möglichst fehlerfreien Beobachtungen, so ergibt sich, daß die mittlere Erddichte größer ist als 5,4 und kleiner als 5,7. Dieser Wert für die mittlere Erddichte ist also bedeutend größer als die Dichte der Gesteine und Mineralien, welche die äußere Kruste zusammensetzen, denn das spezifische Gewicht der Diorite, die doch etwa der Zusammensetzung der äußeren Kruste entsprechen, ist etwa 2,8; auch haben die Feldspäte, die etwa 59 % der ganzen eruptiven Erdkruste ausmachen, nur eine Dichte von 2,5—2,8, der Quarz mit 12 % eine solche von 2,7 und die Hornblenden und Augite mit 17 % eine Dichte von 3,1—3,5. Das Ergebnis dieser ganzen Betrachtungen ist also, daß die mittlere Dichte der ganzen Erde ungefähr doppelt so groß ist, als die mittlere Dichte der äußeren Kruste. Daraus folgt aber mit absoluter Sicher-

Digitized by Google

heit, daß sich in den inneren Partien unserer Erde bedeutend dichtere Massen vorfinden müssen, und zwar nicht nur dichter als die an der Oberfläche, sondern auch dichter als die mittlere Erddichte ist.

3. Verteilung der Dichte im Erdinnern.

Wie ist nun die Verteilung der Dichte im Erdinnern, und wie groß ist die Dichte in den zentralen Partien? Auf diese beiden Fragen sollen uns die folgenden Hypothesen die Antwort geben. Das älteste Dichtegesetz ist von Laplace, der annimmt, daß die Dichte nach dem Innern in einer arithmetischen Reihe zunehme. Er setzt die Oberflächendichte $\varrho = 3$, den Erdradius $= 1$ und findet so für die Dichtigkeit ϱ' im Abstande a vom Mittelpunkte $\varrho' = \varrho[1 + e(1 - a)]$, wobei $e = 2{,}349$ ist. Daraus ergibt sich für den Mittelpunkt eine Dichte von 10,047.

Plana berechnete aus der Präzession und Nutation unter der Annahme einer mittleren Erddichte von 5,5832 die Dichte an der Oberfläche zu 1,877 und die im Mittelpunkt zu 16,73 [40]) S. 35. Unter Benutzung der Vorarbeiten von Clairaut, Legendre und Laplace hat Lipschitz [86]) ein Dichtegesetz aufgestellt, ausgehend von der Voraussetzung, daß alle Punkte gleicher Dichte auf ellipsoidähnlichen Flächen mit dem Erdmittelpunkt als Zentrum liegen. Das Resultat seiner Untersuchungen ist $\varrho(b) = 9{,}453 - 6{,}953\left(\frac{b}{c}\right)^{2{,}39}$; dabei ist $\varrho(b)$ die Dichtigkeit einer Schicht, wenn b der Radius einer Kugel ist, deren Oberfläche gleichen Inhalt hat wie die Oberfläche der betreffenden Schicht und c der Wert für b ist, welcher der Oberfläche der ganzen Masse entspricht. Infolgedessen würde die Dichte im Mittelpunkt 9,453 sein. Außer einem ziemlich komplizierten Dichtegesetz von Darwin [87]) sind noch die Arbeiten von Stieltjes [88]), Callandreau [89]) und Radau [90]) zu nennen. Stieltjes kommt durch eine längere mathematische Untersuchung dahin, für die Dichtigkeit in verschiedenen Tiefen den oberen und unteren Grenzwert zu berechnen und zwar aus der Oberflächendichte, der mittleren Erddichte, den Trägheitsmomenten, der Abplattung und dem Verhältnis der Zentrifugalkraft zur Schwerkraft am Äquator. Je nach den für die Differenz der Trägheitsmomente benutzten Werten ergeben sich als obere und untere Grenze für die Dichte in verschiedenen Tiefen folgende Werte:

(Tabelle siehe folgende Seite.)

Die Arbeiten von Callandreau sind insofern bemerkenswert, als er durch eine kurze Abhandlung von Tisserand [91]) angeregt,

Digitized by Google

r	Obere Grenze für die Dichte T (r)	Untere Grenze für die Dichte t (r)	Obere Grenze für die Dichte T (r)	UntereGrenze für die Dichte t (r)
Zentrum 0,00	11,00	7,00	12,16	7,61
0,05	10,64	7,00	11,72	7,61
0,10	10,28	7,00	11,28	7,61
0,15	9,92	7,00	10,85	7,61
0,20	9,57	7,00	10,43	7,61
0,25	9,24	7,00	10,02	7,61
0,30	8,92	7,00	9,63	7,61
0,35	8,62	7,00	9,27	7,61
0,40	8,34	7,00	8,93	7,61
0,45	8,08	7,00	8,62	7,61
0,50	7,84	7,00	8,33	7,51
0,55	7,63	6,90	8,07	7,24
0,60	7,44	6,64	7,84	6,87
0,65	7,27	6,29	7,63	6,44
0,70	7,11	5,92	7,05	6,00
0,75	6,87	5,56	6,43	5,56
0,80	6,24	5,20	5,81	5,12
0,85	5,62	4,83	5,20	4,68
0,90	4,99	4,29	4,58	4,05
0,95	4,37	3,45	3,97	3,32
1,00	2,60	2,60	2,60	2,60

zuerst nachweist, daß für kein Dichtegesetz sich eine Übereinstimmung mit den aus Präzession und Nutation abgeleiteten Werten erzielen läßt, wenn man für die Abplattung den beobachteten Wert $\frac{1}{293{,}5}$ annimmt. Mit Hilfe der Ergebnisse von Radau, der aus der Ellipticität, der Dichte und dem mittleren Radius einer Schicht die Abplattung zu $\frac{1}{297}$ berechnete, gelangte Callandreau[89c]) zu noch weitergehenden Schlüssen. Alle Dichtegesetze, die sich für die Erde aufstellen lassen, ergeben denselben Abplattungswert $\frac{1}{298}$; erhält man also durch Beobachtungen einen von $\frac{1}{298}$ wenig abweichenden Wert, so läßt sich die Dichte im Erdinnern nicht durch eine stetige Funktion darstellen. Die ganzen Dichtegesetze wären also unbrauchbar, wenn nicht durch Helmert nachgewiesen wäre, daß sich bei genauerer Berechnung aus den neueren Beobachtungen für die Abplattung der Erde $\frac{1}{297{,}8 \pm 2{,}2}$ ergäbe, wobei er noch ausdrücklich sagt, daß der mittlere Fehler eher etwas zu groß als zu klein geschätzt ist[78]) S. 473. Seine eigenen Untersuchungen ergeben als Dichtegesetz:

$$\Theta = 11{,}3\left\{1 - 1{,}04\left(\frac{a}{a_0}\right)^2 + 0{,}275\left(\frac{a}{a_0}\right)^4\right\};$$

Digitized by Google

dabei ist a_0 der Erdradius und a der Abstand der Fläche, für welche die Dichte berechnet wird, vom Mittelpunkt. Daraus folgt als Dichte im Zentrum $\Theta_c = 11{,}3$ und an der Oberfläche $\Theta_0 = 2{,}66$ [76]) S. 487. Mit diesen Werten stimmen die von Stapff [92]) gefundenen trotz des verschiedenen Ganges der Ableitung recht gut überein. Er bezeichnet mit γ_0 die Dichtigkeit in der Entfernung r vom Mittelpunkt, mit R den Radius der ganzen Kugel und mit Γ ihre mittlere Dichtigkeit und erhält so als Gesetz:

$$\gamma_0 = \Gamma \frac{(2n+3)\,R^n - (n+3)\,r^n}{2n\,R^n}$$

Die Konstante n muß noch durch eine besondere, geschickte Rechnung ermittelt werden. Stapff bestimmte n zu 1,3238 und erhielt folglich für die Mittelpunktsdichte 11,9095. Zum Schluß möge noch die Abhandlung von Tumlirz [93]) erwähnt werden, der die Dichte der Erde aus der Schwerebeschleunigung und Abplattung berechnet. Je nachdem er die Werte von Pouillet oder Listing für die Schwerebeschleunigung am Pol und Äquator benutzt, erhält er als Dichte im Zentrum 10,864 und 12,929; die entsprechenden mittleren Dichten sind 5,846 und 6,672, was zu gunsten des ersten Wertes spricht, der auch mit den von Stapff und Helmert gefundenen besser übereinstimmt. Vom Standpunkte der Mathematik und Astronomie läßt sich gegen die angeführten Dichtegesetze nichts einwenden, und es würde daraus eine zentrale Erddichte von 9,5—11,1 folgen, wenn man von Planas offenbar zu großem Werte absieht.

4. Chemische Zusammensetzung des Erdinnern.

Es läßt sich aber die hohe mittlere Erddichte auch noch auf eine andere Weise erklären, die ebenso wie die angeführten Dichtegesetze mit den Erfahrungen der Astronomie und Mathematik in Einklang zu bringen ist, dafür aber den Vorteil hat, daß sie mit den geologischen Tatsachen, besonders wenn man die Entstehung der Erde berücksichtigt, besser übereinstimmt. Meiner Ansicht nach ist die Annahme von Dana [94]) und Wiechert [95]), daß die Erde aus einem Kern von Eisen mit einer relativ dünnen Steinkruste bestehe, besser als die, daß die Dichte von außen nach innen kontinuierlich zunehme, denn für die zweite Hypothese haben wir keinen Beweis, für die erste sprechen aber verschiedene noch näher zu erörternde Umstände. Wiechert nimmt als mittlere Erddichte 5,58 und als Dichte des Steinmantels 3,2 an und erhält als Dichte des Metallkerns

Digitized by Google

Werte, die nur wenig über 7,8, der Dichte des Eisens, liegen. Er schließt daraus, daß der Kern unserer Erde hauptsächlich aus metallischem Eisen bestehe, dessen spezifisches Gewicht infolge des großen Druckes etwas höher sei, als an der Oberfläche. Für einen Eisenkern gerade spräche auch die große Verbreitung des Eisens in den Meteoriten und im Sonnenspektrum. Die Dicke des Steinmantels setzt er etwa 1400 km ($^1/_5$ Erdradius), jedenfalls sei sie nicht kleiner als 1200 km und nicht größer als 1600 km. Der Eisenkern hätte dann einen Durchmesser von 10000 km. Das Volumenverhältnis ist für Kern und Schale etwa gleich, während die Massen im Verhältnis 5 : 2 stehen. Unter diesen Voraussetzungen stimmt die berechnete Erdabplattung mit der beobachteten gut überein; was für die aufgestellte Hypothese eine nicht unwesentliche Stütze ist. Wiechert hält es für nötig, zwischen dem Kern und der Steinkruste eine plastische Steinschicht von geringer Dicke anzunehmen und zwar sowohl wegen der Vulkane als auch weil sich bei Erdbeben von den Erdbebenzentren die Erschütterungswellen längs der Erdrinde fortpflanzen, was nur bei einer Kruste möglich ist, die durch eine nachgiebige Schicht von dem starren Kern getrennt ist. „Der Unterschied in dem Verhalten von plastischer Schicht und starrem Kern mag zum Teil auf den von uns angenommenen Materialverschiedenheiten in der Erde beruhen, die Hauptsache aber ist wohl, daß der nach innen zu immer weiter steigende Druck die materiellen Moleküle schließlich so enge aneinanderpreßt, daß sie trotz der steigenden Temperatur die gegenseitige Beweglichkeit völlig verlieren. Nach dieser Auffassung kann der starre Erdkern schon lange vor jener Zeit bestanden haben, als die äußere Kruste zu erstarren begann." Dieser Hypothese ist aus folgenden Gründen der Vorzug zu gewähren. Die Kant-Laplacesche Theorie, durch die Untersuchungen der letzten $1^1/_2$ Jahrhunderte etwas modifiziert, faßt Günther[96]) S. 56 kurz so zusammen: „Alle im Sonnensystem von heute vereinigte Materie befand sich über den durch die Bahn des äußersten Planeten gekennzeichneten Raum verteilt, und zwar im vollkommensten Dissolutionszustande, in welchem irgendwelcher mechanischer wie chemischer Unterschied der absolut wesensgleichen Elementarbestandteile noch nicht bestand. Durch Bewegungen dieser Teilchen, zu deren Erklärung man auf Begegnungen mit ähnlich gebildeten Nebelmassen zurückgegriffen hat, leiteten sich lokale Ballungsprozesse ein und durch diese bildeten sich nach und nach, im Laufe unermeßbar großer Zeiträume, die einzelnen Weltkörper heraus, welche teils direkt, teils im Gefolge größerer Massen ihren

Digitized by Google

Umlauf um den Zentralball, die Sonne vollziehen." Eine Hauptstütze für die Kant-Laplacesche Theorie und somit auch für die oben entwickelte Ansicht über das Erdinnere sind die Resultate der Spektralanalyse und die Erkenntnis, daß die Meteoriten Bruchstücke von anderen Weltkörpern unseres Planetensystems sind; denn beide erbringen uns den Beweis, daß die auf der Erde in größerer Masse vorhandenen Elemente auch auf den übrigen Weltkörpern in größerer Masse vorhanden sind. Die Meteoriten bestehen in der Hauptsache aus eisenreichen Verbindungen, zum Teil fast ganz aus Nickeleisenlegierungen, während die Steinmeteoriten der Masse nach dagegen sehr zurücktreten. Dieses Verhältnis von Eisen zum Silikat in der Zusammensetzung läßt sich leicht erklären, wenn man die Entstehung dieser Weltkörper berücksichtigt. Nach der Kant-Laplaceschen Theorie sind sie, wie eben erwähnt, aus Gasen entstanden, die sich bei fortschreitender Abkühlung zu Dämpfen und Flüssigkeiten kondensiert haben. Gleichzeitig trat eine Sonderung nach dem spezifischen Gewicht ein. Zu oberst schwammen die eisenarmen Silikate, darunter folgte eine ziemlich dünne, mit Eisen gesättigte Silikatschicht, und den Kern bildete gediegenes Eisen, was von den Silikaten nicht aufgenommen werden konnte, da ja jede Schmelze je nach ihrer Zusammensetzung und Temperatur nur einen gewissen Prozentgehalt Eisen aufnehmen kann. Geradeso müssen auch die Vorgänge bei unserer Erde gewesen sein, nur könnte es gewagt erscheinen, einen so großen Eisenreichtum im Innern anzunehmen. Könnte man nicht mit demselben Rechte behaupten, der Kern bestehe aus Platin, Gold oder sonst einem Schwermetall? Diese Annahme wäre wegen der im großen und ganzen gleichen Zusammensetzung der verschiedenen Weltkörper, die aus einer homogenen Gasmasse entstanden sind, unwahrscheinlich, da wir ja eben an den Meteoriten gesehen haben, daß bei den anderen Weltkörpern das Eisen so reichlich vertreten ist. Es darf uns nicht verwundern, daß es bis jetzt noch nicht gelungen ist, auf der Erde gediegenes, aus dem Erdkern stammendes Eisen nachzuweisen, wenn wir bedenken, daß die Laven, welche die Erdoberfläche erreichen, ihrer Temperatur nach nur aus einer Tiefe von etwa 60—100 km kommen können, während ja nach Wiechert die eisenreichere Zone erst in etwa 1400 km beginnt. Es sind zwar verschiedentlich gediegene Eisenmassen auf der Erde als Eisen aus dem Erdinnern angesprochen worden, jedoch steht bis jetzt der Annahme nichts entgegen, daß diese Eisenmassen aus eisenreichen Gesteinen beim Durchbrechen von Kohlenlagern durch Reduktion entstanden sind. So haben z. B. die bekannten Eisen führenden Basalte von Ovifak tertiäre Kohlenlager

Digitized by Google

durchbrochen, und das Eisen des Basalts ist dabei teilweise reduziert worden. Daß diese letzteren gerade nicht aus den eisenreichen Partien des Erdinnern stammen können, darauf weist der Umstand hin, daß der Eisengehalt jenes Basalts inkl. des gediegenen Eisens geringer ist als der Eisengehalt vieler anderer kein metallisches Eisen führender Basalte.

Aus dem oben angeführten Grunde ist aber das Fehlen von metallischem Eisen aus dem Erdinnern kein Beweis gegen die Existenz eines Eisenkerns, sondern vielmehr erscheint mir nach unseren jetzigen Kenntnissen die Wiechertsche Hypothese über die Stoff- und Dichteverteilung im Erdinnern als die beste.

5. Temperatur des Erdinnern.

Nachdem wir uns ein Bild über die chemische Zusammensetzung der Erde zu machen gesucht haben, wollen wir jetzt dazu übergehen, die Temperatur der zentralen Erdschichten zu betrachten. Es ist eine allgemein feststehende Tatsache, daß, wenigstens in den uns erreichbaren Tiefen, jenseits der neutralen Schicht mit wachsender Tiefe die Temperatur zunimmt. Die eben aufgestellte Behauptung ist auf eine Fülle von Beobachtungen gestützt. Jeder Tunnel, jedes Bergwerk und jedes Bohrloch zeigt mit wachsender Tiefe eine Temperaturzunahme. Die beiden ersteren sind infolge vieler störender Einflüsse nur brauchbar, um die allgemeine Temperaturzunahme zu beweisen; für die Aufstellung eines Gesetzes der Temperaturzunahme sind sie dagegen ungeeignet. Ich will mich daher auch mit einer geringen Anzahl von Beobachtungen in Tunnels und Gruben begnügen und nur deshalb nicht ganz darauf verzichten, daß man nicht etwa behaupten könne, die Temperaturzunahme der Bohrlöcher sei durch die Erwärmung beim Bohren oder lokale Einflüsse bedingt.

a) Temperaturbeobachtung in Tunnels und Bergwerken.

Im St. Gotthard-Tunnel stieg die Temperatur auf 30,43 ° C [97]) und in dem erst voriges Jahr fertig gestellten Simplontunnel sogar auf 53,6 ° C [98]) S. 60, 61. Ebenso hat man in allen Gruben eine wenn auch oft sehr verschiedene Temperaturzunahme beobachtet; so fand man z. B. im Adalbertschacht bei Přibram in 889,3 m Tiefe eine Temperatur von 21,80 ° C [58]) S. 10, in einem Kupferbergwerk der Keweenaw-Halbinsel (Michigan) in 1396 m Tiefe nur 26,1 ° C [99]).

b) Temperaturbeobachtungen in Bohrlöchern.

Im Jahre 1867 begann man bei Sperenberg, 5½ Meilen südlich von Berlin, in einem verlassenen Gipsbruch ein Bohrloch anzulegen,

Digitized by Google

das für die Temperaturbeobachtungen von allergrößter Wichtigkeit wurde [100]). Man durchbohrte der Reihe nach 2 Fuß Schutt, 278,5 Fuß Gips, 5 Fuß Gips mit Anhydrit, 2 Fuß Anhydrit und traf in 283 Fuß Tiefe auf reines Steinsalz. Am 10. Oktober 1871 hatte das Bohrloch eine Tiefe von 4052 rheinländischen Fuß, wovon sich die unteren 3769 Fuß im Steinsalz befanden. Gerade weil ein so großer Teil des Bohrloches durch dasselbe Gestein ging, war dieses Bohrloch für Temperaturbeobachtungen so besonders geeignet. Bis 444 Fuß war das Innere mit einer Eisenblechverröhrung ausgekleidet und daher für Temperaturbeobachtungen nicht zu brauchen. Da bei der großen Tiefe auch die Wasserzirkulation eine ziemlich bedeutende war, so mußte man, um die wahre Gesteinstemperatur zu bekommen, einzelne Teile der im Bohrloch befindlichen Wassersäule abschließen, denn sonst hätte man in den oberen Schichten die Temperatur zu hoch und unten zu tief gefunden. Man erhielt so folgende Resultate:

Tiefe in Fuß	Temp. in ° R		Temp. in ° R		Temp. in ° R
700	17,06		17,275		
900	18,50	Nach	18,780	Das entspricht	0,752
1100	20,80	Anbringung der	21,147	auf 100 Fuß	1,183
1300	21,10	nötigen	21,510	Tiefenzunahme	0,181
1500	22,80	Korrektionen	23,277	einer	0,883
1700	24,20	ergab sich	24,741	Temperatur-	0,732
1900	25,90	daraus	26,504	zunahme von	0,881
2100	28,00		28,668		1,082
3390	36,15		37,238		0,664

Roth nimmt als mittlere Jahrestemperatur von Sperenberg die von Berlin, 7,18 ° R an und berechnet nach der Methode der kleinsten Quadrate aus den Beobachtungen folgende Temperaturreihe:

Tiefe in Fuß	Temp. in ° R	Zunahme für 100 Fuß Temp. in ° R
700	15,654	1,097
900	17,849	1,047
1100	19,943	0,997
1300	21,937	0,946
1500	23,830	0,896
1700	25,623	0,846
1900	27,315	0,795
2100	28,906	0,608
3390	36,756	

Daraus ergibt sich für 100 Fuß Tiefenzunahme 0,904 ° R Temperaturzunahme, oder eine geothermische Tiefenstufe von 27,8 m auf 1 ° C.

Auch Dunker [101 a–e]) selbst, unter dessen Leitung die Bohrungen in Sperenberg angestellt wurden, hat mehrere Abhandlungen über die dort gemachten Beobachtungen veröffentlicht. Nach einer Beschreibung des Geothermometers von Magnus [101 b]) S. 321 [101 d]), S. 15 gibt er folgende Zusammenstellung der mit diesem Instrument in Sperenberg angestellten Beobachtungen:

Digitized by Google

Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R	Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R
100	11,0	3100	35,2
200	11,6	*(3150)	(32,4)
300	12,3	3200	35,3
400	13,6	*(3250)	(32,6)
500	14,0	3300	35,8
600	15,2	*(3350)	(33,3)
700	15,6	†(3390)	(36,6)
800	16,2	3390	33,6
900	16,8	†(3390)	(36,5)
1000	18,6	3390	33,9
1100	19,1	3390	33,8
1200	20,2	3390	33,9
1300	20,5	3390	33,9
1400	21,9	3400	33,8
1500	22,1	3450	34,7
1519	23,2	3500	35,2
1600	23,5	3513	35,2
1668	23,6	3545	35,4
1700	23,8	3550	35,4
1704	23,5	3570	35,6
1763	24,3	3584	35,6
1800	25,0	3600	35,7
1900	25,4	3640	35,9
2000	26,4	3650	35,9
2035	26,4	3665	36,0
2075	26,5	3690	36,2
2080	26,5	3700	36,2
2100	26,7	3710	36,3
2200	27,8	3730	36,4
2300	28,8	3746	36,4
2400	29,6	3750	36,4
2500	30,5	3765	36,5
2600	31,1	3783	36,6
2630	31,5	3800	36,6
2700	32,1	3820	36,8
2763	32,4	3834	37,0
2800	32,4	3846	37,0
*(2850)	(30,4)	3850	36,9
2900	33,6	3863	37,0
*(2950)	(31,4)	3900	37,3
3000	34,4	3920	37,5
*(3050)	(31,7)	4042	38,5

Diese so gefundenen Temperaturen zeigen zwar, daß mit wachsender Tiefe die Temperatur im allgemeinen zunimmt, aber sie geben uns nicht die wahre Gesteinstemperatur für die betreffende Tiefe an, denn infolge der auftretenden Zirkulation findet man an der Bohrlochsohle die Temperatur zu gering, während sie in den oberen Partien zu hoch ist. Diese Differenzen zwischen der Gesteinstemperatur und der des im Bohrloch befindlichen Wassers sind natürlich um so größer, je tiefer das Bohrloch ist, da dann den oberen Schichten umsomehr Wärme von unten zugeführt wird. Dies sieht man auch sofort, wenn man

Die mit * und † bezeichneten Beobachtungen sind vorläufig auszuschalten.

Digitized by Google

z. B. die Beobachtungen im Bohrloch I und II in Sperenberg vergleicht. Das Bohrloch I war zur Zeit der Beobachtung 2043—2617 Fuß und II wurde nur 490 Fuß tief.

I Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R	II Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R
100	11,0	100	9
200	11,6	200	10,4
300	12,3	300	11,5
400	13,6	400	12,5

Den Nachweis, daß am Grunde des Bohrloches die Temperatur zu klein gefunden wurde, erbrachte Dunker auf folgende Weise. In 3390 Fuß Tiefe ließ er mit halber Weite $17^1/_2$ Fuß vorbohren und schloß diese kleine Wassersäule durch einen mit Werg und Leinwand umwickelten Stopfen ab und beobachtete nun die mit † bezeichneten Temperaturen obiger Tabelle. Als Mittel ergibt sich aus den beiden Beobachtungen 36,55 ° R, während die Beobachtungen ohne Wasserabschluß nur 33,6—33,9 ° R ergaben. (33,9 ° R ist sicher zu hoch, da diese Beobachtung kurz nach der mit Wasserabschluß gemacht wurde und das Wasser von dieser noch erwärmt war.) Gleichzeitig ergab sich noch durch die Beobachtungen mit Wasserabschluß, daß die vorhergehenden Beobachtungen außer den mit * bezeichneten zu hoch sind und zwar infolge der beim Bohren an das Wasser abgegebenen Wärme. Zur Kontrolle wurden später die mit * bezeichneten Beobachtungen angestellt, die alle bedeutend niedriger ausgefallen sind. Nachdem sich Dunker davon überzeugt hatte, daß die wahre Gesteinstemperatur nur dadurch zu ermitteln sei, daß man kleine Wassersäulen solange abschloß, bis sie die Temperatur des umliegenden Gesteins angenommen haben, konstruierte er einen besonderen Abschlußapparat, da die Beobachtung mit dem Vorbohren einesteils sehr umständlich war, andererseits aber eine nachträgliche Beobachtung in höheren Teilen des Borlochs überhaupt unmöglich ist. Das Prinzip des Abschlußapparates ist folgendes: Ein mit Wasser gefüllter Kautschukballon wird durch den Druck des darüber befindlichen Bohrgestänges breit gedrückt, legt sich an die Wand des Bohrlochs und schließt auf diese Weise eine Wassersäule für die Beobachtung ab. Soll entfernt von der Bohrlochsohle die Temperatur gemessen werden, so werden 2 Ballons eingelassen, zwischen denen sich das Thermometer befindet. (Nähere Beschreibung des Apparats findet sich [101 b)] S. 348 ff. und [101 d)] S. 62 ff.)

Nach Ausschaltung aller ungenügenden Beobachtungen und nach Anbringung der nötigen Korrektionen bleiben folgende übrig:

Digitized by Google

Tiefe in Fuß	Temperatur in ° R
700	17,275
900	18,780
1100	21,147
1300	21,510
1500	23,277
1700	24,741
1900	26,504
2100	28,668
3390	37,238

Aus dieser Reihe leitete Dunker zunächst mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate eine Formel ab, nach der zwar mit wachsender Tiefe die Temperatur zunimmt, jedoch immer langsamer. Er bezeichnet mit S die Tiefe einer Schicht in Fuß und mit T, die dort herrschende Temperatur in R^0 und erhält so $T = 7{,}18 + 0{,}01\,298\,571\,818 \times S - 0{,}000\,000\,125\,701\ S^2$ [101b]) S. 364. Nach dieser Formel würde die Temperatur bei 5162 Fuß mit 40,7 R^0 ihr Maximum erreichen und dann wieder abnehmen, sodaß man für den Mittelpunkt der Erde eine große Kälte erhielte, was jedoch mit allem, was wir über die Abkühlung einer Kugel wissen, in direktem Widerspruch steht. Auf diesen Umstand ist von Henrich [102]) aufmerksam gemacht worden. Er änderte die Formel dadurch ab, daß er sie unabhängig von der mittleren Temperatur der Oberfläche machte, da von dieser die Temperaturzunahme gar nicht abhängt. Er setzt $T = 12{,}273 + 0{,}00\,744\,925$ S. Die auf diese Weise berechneten Werte stimmen viel besser mit den Beobachtungen überein, als die nach der Dunkerschen Formel gefundenen; ferner ergibt diese Formel eine mit wachsender Tiefe stetig zunehmende Temperatur und zwar auf 100 Fuß 0,76° R.

Hottenroth [103]) gibt zwar den Einwand Henrichs gegen die Dunkersche Formel insoweit zu, als er sich gegen die Einführung der mittleren Ortstemperatur wendet; er bestreitet jedoch, daß es richtig ist, wenn Henrich für das Gesetz der Temperaturzunahme nach der Tiefe eine gerade Linie annimmt. Seiner Meinung nach wird es durch eine Parabel dargestellt, eine Annahme, welche sich nicht mit der Hypothese, das Erdinnere sei flüssig, verträgt, sondern für einen festen Kern spricht. Letztere zwar nach Hottenroths Ansicht noch auf schwachen Füßen stehende Hypothese erhielte nach seiner Meinung in den Sperenberger Beobachtungen eine starke Stütze. Diese Abhandlung ist von seiten Henrichs [104]) nicht unbeantwortet geblieben. Er zeigt, daß die Ausführungen Hottenroths keineswegs stichhaltig sind und nicht zu dem Schlusse berechtigen, daß das Erdinnere aus einem kalten, festen Kern bestehe.

Digitized by Google

Dunker hat später seine erste Formel selbst verworfen und spricht sich an verschiedenen Stellen seiner Arbeiten ganz entschieden dafür aus, daß die Wärme in den uns erreichbaren Tiefen wie die Tiefe zunehme, und daß man aus den geringen durch Beobachtungsfehler unvermeidlichen Verzögerungen keineswegs auf Wärmemangel im Erdmittelpunkt schließen dürfe. Die Sperenberger Beobachtungen ergeben nach seinen späteren Berechnungen als Wärmegesetz $T = 17{,}486492 + 0{,}007450129 \cdot (S - 700)$, was einer geothermischen Tiefenstufe von 42 m auf 1^0 R oder 33,7 m auf 1^0 C entspricht[101c]) S. 599; [d]) S. 133—135.

Sowohl das von Dunker als auch das von Henrich aufgestellte Gesetz sind von Brauns[105]) als sehr zweifelhaft hingestellt worden. Brauns ist der Ansicht, daß die in Sperenberg beobachteten Temperaturen nicht die wirklichen Gesteinstemperaturen sind, sondern daß trotz der abgeschlossenen Wassersäulen durch den Dunkerschen Kautschukverschluß eine Erwärmung von unten her stattgefunden hat. Er kommt daher zu dem Schluß, daß von den Sperenberger Beobachtungen weiter nichts übrig bleibt, als daß die Temperatur von $7{,}2^0$ bis 39^0 R auf 4052 rheinische Fuß zugenommen hat, ohne daß ein spezielles Gesetz für die Temperaturzunahme ermittelt worden wäre. Auch Lasaulx[106]) ist der Ansicht, daß man in keiner Weise berechtigt ist, den aus den Sperenberger Beobachtungen gezogenen theoretischen Schlüssen für eine größere Tiefe irgendwelche Gültigkeit zuzusprechen. In dem 577 m tiefen Bohrloch in Sudenburg bei Magdeburg wurde die Temperaturzunahme zum zweiten Male mit dem Dunkerschen Abschlußapparat bestimmt.[101d]) S. 147—152. Es ergab sich eine Temperaturzunahme fast genau proportional der Tiefe, die Dunker durch die Gleichung $T = 9{,}150356 + 0{,}0248245\ S$ darstellt. Es entspricht also 1^0 R Temperaturzunahme 40,3 m oder 1^0 C 32,3 m, Werte, die mit den in Sperenberg gefundenen (42 m bez. 33,7 m) gut übereinstimmen.

Inzwischen hatte die Technik einen gewaltigen Aufschwung genommen, und man hatte die neuen Diamantbohrer konstruiert, mit deren Hilfe man die Bohrlöcher bedeutend tiefer treiben konnte. Dunker[101d]) S. 165 ff.; [107]) beschreibt die Beobachtungen im Bohrloch zu Schladebach bei Dürrenberg, das die ansehnliche Tiefe von 1748 m erreichte. Man durchteufte Zechstein, Rotliegendes, Carbon und drang bis in das Oberdevon. Als die Beobachtungen begannen, hatte das Bohrloch schon eine Tiefe von 1240 m und war bis dahin verröhrt. In dem unverröhrten Teile ergaben sich folgende Temperaturen:

Digitized by Google

Tiefe in m	Temperatur in ° R	Tiefe in m	Temperatur in ° R
1266	36,2	1506	42,3
1296	36,9	1536	42,5
1326	37,7	1566	42,8
1356	38,8	1596	43,6
1386	39,7	1626	44,0
1416	40,4	1656	44,4
1446	40,9	1686	45,2
1476	41,5	1716	45,3

Später stellte man auch von 36—1236 m Beobachtungen an, die eine Temperaturzunahme von 8,8—35,2 ° R ergaben, Werte, die trotz der Verröhrung mit den übrigen gut übereinstimmen. Es folgt daraus für die ganze Länge eine Tiefenstufe von 44,6 m auf 1 ° R oder 35,7 m auf 1 ° C. Das tiefste Bohrloch ist Paruschowitz bei Rybnik in Oberschlesien, das 2003,34 m tief ist. Man führte von 6—1959 m 64 Temperaturbeobachtungen aus, die jedoch eine ziemlich unregelmäßige Wärmezunahme ergaben. Diese Unregelmäßigkeit läßt sich leicht durch die sehr wechselnde Gesteinszusammensetzung erklären. Man durchsank nicht weniger als 82 Steinkohlenflöze, die mit Sandsteinen, Schieferletten, Quarziten, Schiefern mit Eisensteinen und Konglomeraten wechselten. Trotz alledem hat Henrich[108]) eingehend nachgewiesen, daß auch hier die Temperaturzunahme von 12,1—69,3 ° C proportional der Tiefe zunimmt und daß 1 ° C einer geothermischen Tiefenstufe von 31,82 m entspricht.

Auf W. Thomsons Vorschlag wurde eine Kommission unter Prof. Everett als Sekretär beauftragt, die sämtlichen Beobachtungen, die zur Ermittelung der geothermischen Tiefenstufe gemacht sind, zu sammeln und von Zeit zu Zeit darüber Bericht zu erstatten. Unter Benutzung dieser Daten veröffentlichte Prestwich[109]) im Jahre 1886 eine Tabelle sämtlicher bis dahin gemachter Temperaturbeobachtungen, die in einer Arbeit von Jaczewski[110]) bis zum Jahre 1904 vervollständigt ist.

Überblicken wir das Ergebnis aller Temperaturbeobachtungen, so kann man nur sagen, daß 1 ° C einer geothermischen Tiefenstufe von etwa 33 m entspricht. Das Resultat hat mehr praktische als theoretische Bedeutung, da wir wohl bei technischen Unternehmen mit einiger Sicherheit die zu erwartende Temperatur angeben können, aber nicht imstande sind, ein allgemeines Gesetz für die Temperaturzunahme nach dem Erdinnern anzugeben. Etwas anderes können wir auch vorläufig gar nicht verlangen, wenn wir bedenken, daß unsere tiefsten Bohrlöcher immer erst den 3440. Teil des Erdradius durchsunken haben. Die mit aller Vorsicht angestellten neuesten Beobachtungen haben, abgesehen von den durch die Beobachtungs-

Digitized by Google

fehler und die verschiedene Leitungsfähigkeit des Gesteins bedingten Unregelmäßigkeiten, eine der Tiefe proportionale Temperaturzunahme ergeben und nicht wie die früheren Beobachtungen eine langsamere Temperaturzunahme. Diese Tatsache stimmt auch vollständig mit den Beobachtungen von Hann[101d]) S. 84 ff. über die für die Erde geltenden Gesetze der Wärmeleitung und -Strahlung überein, aus denen sich ergibt, daß zwar mit wachsender Tiefe die geothermische Tiefenstufe wächst, daß wir aber diese Zunahme erst in einer Tiefe von 130 000 engl. Fuß merken können, wenn seit Beginn der Abkühlung der Erde 100 Millionen Jahre verflossen sind und in 13 000 Fuß (etwa 4 km) bei einer Abkühlungsdauer von 1 Million Jahre. Pfaff[111]) S. 303 ff. hat auch auf experimentelle Weise das Gesetz der Temperaturzunahme zu finden gesucht, da die Beobachtungen in der Natur gar zu verschieden ausgefallen sind. Die von Bischof zum gleichen Zweck angestellten Versuche hält er wegen des zu geringen Kugeldurchmessers für unzureichend und auch dem wirklichen Zustand der Erde zu wenig nahe kommend. „Denken wir uns die Erdrinde 10 geogr. Meilen dick, so ist, wenn wir uns ein beliebiges Stück der Erde an der Oberfläche mit einer kreisförmigen Basis als Kegel bis in den Mittelpunkt der Erde verlängert denken, der feste Teil dieses Kegels, das Rindenstück, sofern wir den Kegel sehr spitz annehmen, den Durchmesser der Basis z. B. eine Meile also 15 Minuten umfassend, unbedingt als ein Zylinder anzusehen, der mit seiner Grundfläche auf einer erhitzten Masse aufsteht und seitlich gegen Wärmeverlust geschützt ist." Auf Grund dieser Überlegung ordnete er seine Experimente folgendermaßen an: er füllte einen Blechzylinder, der seitlich 7 Öffnungen für Thermometer hatte, mit Quarzsand und umgab ihn außen mit einem Pappzylinder. Den Zwischenraum zwischen beiden füllte er mit Sägespänen, um im inneren Zylinder eine möglichst konstante Temperatur zu erhalten. Das Ganze wurde an drei starken Eisendrähten aufgehängt und bei der ersten Versuchsreihe durch ein Wasserbad, bei der zweiten durch ein Ölbad erhitzt, bis die Thermometer eine konstante Temperatur zeigten. Aus den Beobachtungsresultaten zieht er den Schluß, „daß die Temperaturzunahme mit der Tiefe nicht einer arithmethischen, sondern einer geometrischen Progression folge und daß sie in größeren Tiefen etwas rascher erfolge." Eine Bedeutung zur Lösung des in Rede stehenden Problems kann man diesen Experimenten wohl kaum zusprechen, da sie sich von den wirklichen Verhältnissen gar zu weit entfernen und ihnen sicherlich nicht näher kommen, als die Versuche von Bischof mit den geschmolzenen Kugeln.

Digitized by Google

c) Die Ursache der zentralen Wärme.

In unsern Schlüssen über die Wärmeverhältnisse des Erdinnern sind wir aber nicht allein auf die bisher angeführten Beobachtungen angewiesen, denn sonst wäre es sehr gewagt, eine andauernde, wenn auch gegen das Zentrum hin langsamere Temperatursteigerung anzunehmen. Schon die über die ganze Erde verbreiteten heißen Quellen, aber besonders die Vulkane mit ihren feurigflüssigen Auswurfsmassen zeigen uns, daß die Temperatur noch ganz beträchtlich steigt. Ziehen wir noch in Betracht, daß nach der Kant-Laplaceschen Hypothese die Erde aus einem sehr heißen Gasball durch Abkühlung entstanden zu denken ist, so liegt doch nichts näher als die Annahme, daß die Erdwärme bis in die zentralen Partien zunimmt, und daß sie ein Rest der ursprünglichen Ballungswärme ist. Den direkten Beweis, ob die Erdwärme bis zum Zentrum zunimmt und wo sie herstammt, werden wir nie erbringen können, sondern wir müssen uns stets damit begnügen, die Hypothese als die beste anzusehen, welche am einfachsten, d. h. mit möglichst wenig Nebenannahmen die uns durch die Beobachtungen gebotenen Tatsachen erklärt. Der Leser möge nun selbst urteilen, ob eine der im ersten Teile der vorliegenden Arbeit angeführten Hypothesen oder eine der folgenden, soweit nicht auf andere Weise ihre Unzulänglichkeit nachgewiesen ist, die beobachteten Verhältnisse besser erklärt als die eben angegebene. Volger[112]) gibt zwar eine im Innern der Erde von der Sonne unabhängige Wärmequelle zu, jedoch macht er sich eine von den gewöhnlichen Anschauungen vollständig abweichende Vorstellung. Er führt diese Wärme auf drei Ursachen zurück: 1. Der Druck der oberen Schichten auf die unteren; 2. Die Reibung bei der Bewegung der festen Teile und des Wassers innerhalb der Erde; 3. Chemische, durch die Atmosphärilien hervorgebrachte Vorgänge.

Dieser Hypothese ist die von Mohr[113]) S. 198 ff.; [114]) aufgestellte ziemlich ähnlich. Er führt die innere Erdwärme auf die in Wärme umgesetzte Sonnenarbeit zurück. Das von der Sonne auf der Erdoberfläche verdampfte Wasser fällt als destilliertes Wasser aus den Wolken hernieder, dringt in die Erde ein und kommt, nachdem es feste Bestandteile aus der Erde aufgenommen hat, wieder an die Oberfläche. Durch dieses Auswaschen der Erdkruste entstehen im Innern Hohlräume, infolge deren Senkungserscheinungen auftreten, welche die im Erdinnern beobachtete Wärme erzeugen sollen. „Daß die Wärmezunahme nicht bis zur Schmelzhitze der Granite, Syenite, Basalte ausgedehnt werden dürfe, geht aus den Eigenschaften dieser Gesteine hervor, welche eine feuer-flüssige Entstehung verneinen“ [115])

Digitized by Google

S. 201. Abgesehen von der heute für überwunden geltenden Ansicht der Neptunisten ist durch Pfaff[111]) S. 12—25 eine geradezu vernichtende Kritik an diesen beiden Hypothesen geübt worden, indem er an mehreren Beispielen durch Rechnungen nachweist, daß die von Volger und Mohr angenommenen Wärmequellen nicht im entferntesten ausreichen, sondern daß wir vorläufig die Hitze im Innern nur als Rest der einstigen Ballungswärme erklären können. Trotzdem alle Beobachtungen dagegen sprechen, daß das Erdinnere seine Wärme von außen empfange, hat doch Treubert[115]) die Ansicht ausgesprochen, die Sonne sei die Ursache der inneren Erdwärme, indem sie wie die Luft auch das Innere erwärme. Die Sonne erwärme den Erdboden, der seine Temperatur der untersten Luftschicht mitteilt, die infolgedessen in die Höhe steigt und sich bei der dabei stattfindenden Ausdehnung wieder abkühlt. Gleichzeitig sinken kältere Luftteilchen herab, gelangen unter größeren Druck und erwärmen sich. Auf diese Weise entstehen Temperaturunterschiede von 1,4° auf 100 m oder 1° auf 71 m. Diesen Verhältnissen sind nach Treuberts Ansicht die in der festen Erde ganz analog. Die Erdrinde sei viele Meilen für Luft und Wasser durchlässig. Diese Bodenluft steht mit der Atmosphäre durch viele Kanäle in Verbindung, und nach seiner Ansicht müßten in dieser „Gesamtatmosphäre" die gleichen Vorgänge stattfinden wie in der Atmosphäre, d. h. die Temperatur muß mit der Tiefe zu- und mit der Höhe abnehmen, und die Tiefenstufe müßte, abgesehen von lokalen Störungen, 71 m betragen. Küppers bemerkt hierzu sehr richtig, daß ein großer Unterschied zwischen „Gesamtatmosphäre" und Atmosphäre besteht in bezug auf die Lage der Wärmequelle. Für die zweite liegt sie (die Erdoberfläche) unterhalb der erwärmten Luftmassen, für die erste jedoch oberhalb. Dieser kleine Unterschied dürfte doch auf die Wärmezirkulation einigen Einfluß haben und der Treubertschen Hypothese jede Existenzberechtigung nehmen. Die von Treubert angenommenen Zirkulationen der Bodenluft verlangen eine Wärmequelle im Innern der Erde, und er gibt uns so selbst das Mittel in die Hand, die Unzulänglichkeit seiner Hypothese zu beweisen. Sehen wir aber selbst davon ab, so zeigt Küppers, daß die von Treubert aufgestellte Hypothese auch sonst noch der schwachen Seiten genug hat. Auf alles im einzelnen einzugehen hat keinen Zweck, und ich will nur noch erwähnen, wie sich Treubert die Entstehung der Gebirge denkt. Sowohl in den Meeren als in den darunter befindlichen, mit Wasser durchtränkten Schichten herrsche eine sehr niedrige Temperatur, so daß sich dort große Eisbodenfelder befinden, bei

Digitized by Google

deren Bildung infolge der Ausdehnung des Wassers beim Gefrieren ein großer Druck auf die angrenzenden Küsten ausgeübt wird. Nach Treuberts Rechnung wären auf diese Weise durch das Saharameer die Alpen aufgerichtet worden. In den Voraussetzungen ist aber nach Küppers zweierlei nicht richtig, nämlich 1. ist die Bodentemperatur nur außerhalb der Polarkreise unter 0° und in den Breiten der Sahara am Meeresgrunde etwa 2°—3°; 2. setzt aber der Eisboden selbst einer solchen Faltung einen geringeren Widerstand entgegen als die Küsten und müßte daher vor allen Dingen selbst gefaltet werden, während auf die Küsten nur eine geringe Kraft wirken könnte. Eine ähnliche Erklärung gibt Treubert für den Vulkanismus. Bei etwa 200 km Tiefe würde die Temperatur etwa 3000° erreichen, und sämtliche Gesteine würden flüssig sein. Hier würde aber auch die Temperatursteigerung aufhören, da die Luft nicht weiter eindringen kann, und jenseits muß die Wärme wieder abnehmen, womöglich weit unter 0°. Das subozeanische Bodeneis schiebe nasse Erdschichten in die Nähe des Magmaherdes, dort würden sie geschmolzen, und der entstehende Wasserdampf preßte sie nach der Erdoberfläche. Auf diese Weise entständen die Vulkane. „Eine sehr primitive Anschauung" (Küppers).

Ebenfalls auf die Sonne, wenn auch in anderer Weise, sucht Jaczewski[110]) die Erdwärme zurückzuführen. Nach seiner Meinung müßten wir überall dieselbe geothermische Tiefenstufe finden, trotz der verschiedenen Leitungsfähigkeit der Gesteine, wenn die Ursache dieser Wärme in den zentralen Partien der Erde zu suchen wäre, da sich zwischen der von außen zugeführten Sonnenwärme und der inneren ein stationärer Zustand bilden müsse, so daß sich jenseits der neutralen Schicht überall dieselbe geothermische Tiefenstufe ergäbe. Aus der Tatsache, daß die geothermische Tiefenstufe nicht überall gleich groß gefunden wurde, schließt Jaczewski, daß die Temperaturzunahme nicht von der bisher angenommenen Ursache abhängen könne. Seiner Ansicht nach genügen auch die chemischen Prozesse in der Erdrinde nicht, um diese Verschiedenheiten zu erklären. Diese eben angeführten Gründe erscheinen mir nicht hinreichend, die zentrale Erdwärme zu leugnen. Denn abgesehen davon, daß die durch chemische Prozesse entstandene Wärme zu gering angeschlagen wird, vergißt Jaczewski ganz den Einfluß der in der Erdrinde zirkulierenden Wassermassen, die teils erwärmend, teils abkühlend wirken, ebenso wie den der Vulkane und der unterirdisch erstarrenden Magmen. Ferner ist aber auch die Wärmeleitungsfähigkeit durchaus nicht so ohne Belang, da die Wärmeleitungsfähigkeit der unsere Erde

Digitized by Google

zusammensetzenden Stoffe sehr schwankt, wie ein Blick auf folgende Tabelle zeigt, in der die Wärmeleitungskoeffizienten für einige Substanzen angegeben sind[173]):

Marmor	0,0054—0,0352
Basalt	0,00317—0,0067
Feuerstein	0,0024
Kalktuff	0,01523
Sandstein	0,0024—0,03072
Gips	0,0031
Quarz	0,01576
Gneiß	0,0005770—0,0081
Porphyr	0,0083
Granit	0,0004159—0,0097
Lava	0,1358
Steinkohle	0,000297—0,00044
Steinsalz	0,0137
Eisen	0,09—0,2 (je nach den Beimengungen).

Im weiteren Verlauf seiner Abhandlung entwickelt Jaczewski eine neue Theorie über die Entstehung der Erde, mit Hilfe deren er gleichzeitig den Beweis zu erbringen sucht, daß das Erdinnere kalt sei, und daß daher die Temperaturzunahme nur von der durch die Sonne zugeführten Wärme abhänge. Er nimmt an, daß die Temperatur des Weltenraumes eine sehr niedrige ist, und daß auch der einst über den ganzen Weltenraum zerstreute Stoff eine sehr niedrige Temperatur gehabt hat. Dagegen wäre durchaus nichts einzuwenden, wenn der Verfasser sich so den Urzustand unseres ganzen Sonnensystems vorstellen würde, als noch die ganze Materie in Uratome aufgelöst war. Jedoch schon beim Zusammentritt dieser Uratome zu Atomen und Molekülen wurde eine beträchtliche Wärmemenge frei, die sich bei fortschreitender Verdichtung immer mehr steigern und, da wir es bei so hohen Temperaturen mit überkritischen Gasen zu tun haben, auch auf die ganze Masse gleichmäßig ausdehnen mußte. Von dieser sehr heißen Zentralmasse, der Sonne, trennten sich nun erst die Teile ab, welche die einzelnen Planeten mit ihren Monden bildeten, unter denen sich auch unsere Erde befindet. Jaczewski nimmt aber an, daß selbst als die Massen, die unsere Erde jetzt bilden, schon von der Sonne abgetrennt waren, ihre Temperatur noch die des Weltenraumes war, was nach dem eben Ausgeführten unmöglich ist. Es ist daher auch ganz zwecklos, auf seine weiteren Folgerungen in Bezug auf die Erdentstehung näher einzugehen, und ich will der Vollständigkeit halber seine weiteren Ausführungen nur kurz angeben. Er nimmt an, daß der Kern der kalten Nebelmasse sich verdichte und die dabei entstehende Wärme nach außen abgab. „Je mehr der Prozeß der Konzentration des Stoffes vorwärts schreitet, desto größere Wärmemengen werden vom Zentrum an die Peripherie abgegeben und wird das Zentrum der kälteste Teil des

Digitized by Google

ganzen Systems sein." Infolgedessen soll sich auch die erste feste Substanz im Zentrum gebildet haben, und die Verfestigung sei von da in konzentrischen Schichten nach außen fortgeschritten. Das Erdinnere wäre also eine kalte, feste Masse, und die Gebirge könnten nicht durch Kontraktion bei der Abkühlung der Erde entstanden sein, sondern sie wären durch die Wirkung der Sonne auf die Erdoberfläche entstanden. Jaczewski denkt sich nämlich, daß die Sonne in der festen Erdrinde ähnliche Strömungen der Massen hervorbringt wie in den Meeren, und zwar soll eine Anhäufung von Sonnenenergie am Äquator eine Verschiebung der festen Massen nach den Polen bewirken. Die vulkanischen Erscheinungen sollen die „Folgeerscheinung von stürmischen chemischen Reaktionen" sein, „welche im Erdinnern infolge der durch die periodischen Wirkungen der Sonnenenergie hervorgerufenen Gleichgewichtsstörungen entstehen".

Eine ganz eigenartige Erklärung für die innere Erdwärme ist von Liebenow[116]) gegeben worden, indem er das Radium als die Ursache angibt. Er setzt die vom Innern pro Sekunde abgegebene Wärmemenge 10^{10} Kilogrammkalorien. Nach Paschen ist die von 1 g Radium in einer Stunde erzeugte Wärmemenge = 226 Grammkalorien, es müßten also $2{,}10^{14}$ g Radium in der Erde vorhanden sein, um die Temperatur konstant zu erhalten. Dies ist bei gleichmäßiger Verteilung auf die ganze Erde $^1/_{5000}$ mg pro Kubikmeter, nur auf die Oberfläche verteilt 0,4 g pro qm, eine Radiummenge, die in einer 6 cm dicken Schicht Joachimsthaler Pechblende enthalten ist. Daher können in der Tiefe keine größeren Mengen Radium vorhanden sein, oder die Verteilung über die Erde ist ungleichmäßig, sodaß das Vorkommen oder wenigstens die Zersetzung nur auf eine geringe Oberflächenschicht beschränkt ist. Dann müßte allerdings nach Liebenows Ansicht auch die Temperatur nur in der Nähe der Oberfläche zunehmen, und jenseits jenes Gebiets würde das ganze Innere einen gleichen, vielleicht nicht allzuhohen Maximalwert besitzen. Daß z. Z. ein großer Teil, ja vielleicht die ganze Wärme, die unsere Erde an den Weltenraum verliert, durch die radioaktiven Elemente geliefert wird, ist nicht zu bezweifeln, und die auf S. 23 zitierten Worte Thomsons über den Wärmeverlust der Erde klingen vom heutigen Standpunkt fast wie eine Prophezeiung. Jedoch kann sich diese Wärmeentwicklung immer nur auf eine relativ dünne Außenzone erstrecken und nie bis zur Schmelzhitze der Laven steigern, da die Emanation dieser Substanzen gerade nur bei niedriger Temperatur stattfindet und bei höherer aufhört. Es dürfte dies damit zusammenhängen, daß das, was wir als Elemente bezeichnen, schon Komplexe

Digitized by Google

von Uratomen sind und zwar um so komplizierter, je höher das Molekulargewicht ist. Diese Elemente haben sich vermutlich bei sehr hoher Temperatur gebildet, und die mit dem höchsten Molekulargewicht sind unter den heute auf unserer Erde herrschenden Verhältnissen nicht mehr bestandfähig und fangen an, unter Wärmeentwicklung in leichtere zu zerfallen wie z. B. das Radium in Helium. Es ist daher zu erwarten, daß dieser Zerfall von den schwersten zu immer leichteren Elementen fortschreiten wird, und auf diese Weise die vollständige Abkühlung der Erde in immer weitere Ferne gerückt wird. Trotzdem aber brauchen und können wir nicht auf die Annahme verzichten, daß sich im Erdinnern noch ein Rest der ursprünglichen Ballungswärme findet, da wir sie einerseits nötig haben, um die vulkanischen Erscheinungen erklären zu können, und da sie sich andererseits auch aus der ganzen Entstehung unserer Erde mit Notwendigkeit ergibt.

d) Die Höhe der Temperatur im Erdinnern.

Es dürfte daher der Versuch, eine obere und untere Grenztemperatur für das Erdinnere festzustellen, nicht ohne Interesse sein. Die niedrigste Temperatur, die in den zentralen Partien unserer Erde möglich ist, muß sicher höher sein als der höchste Schmelzpunkt irgendeiner der von den heutigen Vulkanen ausgeworfenen Laven. Die Zahlenangaben über den Schmelzpunkt der Laven weichen ziemlich voneinander ab und sind früher sicher zu hoch geschätzt worden. Es ist ein Verdienst von Brauns[178]) darauf aufmerksam gemacht zu haben, daß die von den Laven beim Ausbruch schon mitgebrachten Kristalle uns ein Mittel an die Hand geben, die obere Grenze für die Temperatur der Lava zu bestimmen, insofern als diese unterhalb der Schmelztemperatur dieses Minerals bei den gegebenen Bedingungen liegen muß. Brauns schätzt die Temperatur der Laven auf 1000°, eher noch weniger. Da nun diese Laven nicht direkt aus dem Erdinnern kommen, sondern aus peripherischen Herden, so haben sie schon einen Teil ihrer Wärme auf dem Wege vom Innern bis zum Herd und von da bis an die Oberfläche verloren; ferner wird aber auch Wärme beim Entweichen der Gase aus dem Magma verbraucht, so daß man nicht fehlgehen wird, wenn man als untere Grenztemperatur für das Erdinnere mindestens 2000° C annimmt. Noch unsicherer werden die Angaben für eine obere Temperaturgrenze. Soviel läßt sich jedenfalls sagen, daß die höchste zu erwartende Temperatur unterhalb der kritischen Temperatur der Stoffe liegen muß, die im Erdinnern in größerer Masse vorhanden sind, denn erst

Digitized by Google

nachdem die Temperatur soweit gesunken war, konnte eine Sonderung nach dem spezifischen Gewicht eintreten, während die Stoffe im überkritischen Zustande vollständig gemischt waren. Da wir, meines Wissens, keine experimentellen Bestimmungen über kritische Temperaturen von Metallen besitzen, so sind wir auf die theoretisch von Guldberg[117]) gefundenen Werte angewiesen. Er findet für die absolute kritische Temperatur des Quecksilbers rund 1000° und berechnet daraus für die übrigen Metalle:

Cu	3900°	Pb	2000°
Ag	3600°	Sb	5800°
Au	4300°	Bi	4600°
Zn	2600°	Fe	5200°
Cd	2500°	Pd	5700°
Al	3000°	Pt	7000°
Sn	3000°		

Wenn diese so gefundenen Werte nicht allzusehr von den wahren abweichen, so wird man als obere Grenze der Innentemperatur, um sie nicht zu niedrig zu fassen, rund höchstens 10000° C annehmen können. Innerhalb dieser Grenzen von 2000—10000° C dürfte dann die Temperatur sicher zu suchen sein, während sich so undenkbar hohe Werte, wie sie z. B. Ritter und Günther annehmen, mit der Entstehung unserer Erde nicht in Einklang bringen lassen, was im letzten Abschnitt noch näher gezeigt werden soll.

6. Der Zustand des Erdinnern.

a) Gasförmiger Zustand.

Wir kommen jetzt zum letzten Abschnitt der vorliegenden Arbeit, der sich mit der Frage beschäftigten soll: „In welchem Zustande befinden sich die zentralen Massen unserer Erde?“ In keinem Punkte herrscht eine größere Meinungsverschiedenheit unter den einzelnen Forschern als in diesem, denn man hat das Erdinnere als fest, flüssig und gasförmig angenommen und die einzelnen Hypothesen mit mehr oder weniger Geschick verteidigt. Hören wir zunächst die bisher aufgestellten Hypothesen, um uns dann, soweit es möglich ist, ein Urteil über die in Rede stehende Frage zu bilden. Schon Franklin[17]) und Lichtenberg[18]) sprachen die Ansicht aus, das Erdinnere sei von stark komprimierten Gasen erfüllt. In neuerer Zeit ist die Hypothese, das Erdinnere sei gasförmig, wieder aufgenommen und verschiedentlich zu beweisen gesucht worden. Hier sind zunächst eine Reihe von Abhandlungen von Moldenhauer[118]) (1874/75) zu erwähnen, der die Entwicklung unserer Erde von ihrer Entstehung bis zum Untergang in 6 Epochen teilt.

Digitized by Google

1. Die Ringformepoche: Die Masse unseres Sonnensystems hat sich zu einem Dunstball mit etwa 50 Millionen Meilen Durchmesser und einer Dichte von höchstens $^1/_{300}$ des Wasserstoffs kondensiert. Mit fortschreitender Verdichtung zu einem Ball von etwa 30 Millionen Meilen Durchmesser nimmt die anfangs über $1^1/_2$ Jahre betragende Rotationsdauer auf weniger als ein Jahr ab. Gleichzeitig sondern sich am Äquator Teilchen zu einem ringförmigen Gebilde ab, da die Zentrifugalkraft größer ist als die Schwerkraft. Infolge der außen geringeren Geschwindigkeit als innen zerreißt dieser Ring, ballt sich aber durch die Attraktion der einzelnen Teilchen zu einer Kugel zusammen, — etwa $^1/_5$ der Dichte des Wasserstoffes — die den Sonnenball in 365 Tagen umkreist. „Der Erdplanet hat sein Dasein begonnen."

2. Die Verdichtungsepoche: Die Verdichtung der Erde schreitet fort, und gleichzeitig tritt außer einer Sonderung der einzelnen Stoffe nach dem spezifischen Gewicht eine bedeutende Erwärmung ein. Die Bewegung der Sonne bringt auch eine Drehung um die eigene Achse hervor, erst langsam und dann immer schneller, bis schließlich die Zentrifugalkraft am Äquator so groß ist, daß sich ein neuer Weltkörper, der Mond, von der Erde auf gleiche Weise abtrennt wie diese von der Sonne. Einem weiteren Abschleudern von Massen wird dadurch ein Ziel gesetzt, daß die Erwärmung der Verdichtung entgegenwirkt, indem sich zwischen beiden ein Gleichgewichtszustand herstellt.

3. Die Sphärenbildungsepoche: Die äußersten Partien geben ihre Wärme an den kalten Weltenraum ab, treten zu einfachen Verbindungen zusammen und dringen infolge ihres höheren spezifischen Gewichts in das Innere ein, wo sie zwar anfangs durch die große Hitze wieder zersetzt werden, sich aber schließlich doch zu einer dichteren Sphäre ansammeln können. Die fortschreitende Abkühlung bewirkt die Bildung von neuen Sphären mit komplizierter zusammengesetzten Molekülen, bis endlich eine dichte, nicht mehr aus Molekülen, sondern aus Mineralpartikelchen bestehende Nebelmasse entsteht, die bei weiterer Temperaturabnahme vermöge ihres hohen Gewichts als Hagel bis ungefähr 850 Meilen an den Mittelpunkt vordringt. Dort werden die Kristalle durch die große Hitze anfangs wieder verflüchtigt, aber die fortwährend nachdringenden bleiben schließlich doch bestehen und bilden „eine in den oberen Horizonten bis zur Kohärenz dichte Schicht", wodurch die weitere Sphärenbildung abgeschlossen ist. „Der Planet hat sich konstituiert. Er besteht aus einem äußerst dichten, aber in Anbetracht seiner abso-

Digitized by Google

luten Nichtkohärenz gasförmigen, vorwiegend metallischen Kern, einer diesen umspannenden, kohärenten, glutflüssigen, später starr werdenden Hülle oder Rinde und einer weit ausgedehnten, stoffreichen, ansehnlich dichten und vorläufig noch sehr heißen Atmosphäre."

4. Die Ablagerungsepoche: Durch weitere Niederschläge auf der Erdrinde lichtet sich die Atmosphäre. Die zunächst abgelagerten Doppelsilikate verdampfen zu feinen Mineralpartikelchen und geben ein dichtes, homogenes basalitisches Gestein. Sobald die Kristalle nicht mehr alle verdampfen, nimmt das Gestein einen porphyrischen Habitus an. Es lagern sich Feldspäte, Quarze und Glimmer ab und bilden Granite. Ferner entstehen auch Gneiße, indem die quantitativ und qualitativ verschiedenen Niederschläge die Schichtung im abgelagerten Gestein hervorbringen. Durch weitere Niederschläge von kohlensaurem Kalk, Quarz etc. nimmt die Dicke der Erdkruste so zu, daß sie in ihren oberen Partien, wenn auch noch glühend, so doch fest ist. Ganz wesentlich wird die Abkühlung der Erdoberfläche dadurch beschleunigt, daß die in den oberen Regionen ziemlich kalte Atmosphäre nun auch die Wasserdämpfe als Regen abgibt. Die ersten Tropfen verdunsten zwar immer sofort wieder und lassen die in ihnen gelösten Stoffe (Ton, Kalk, Salz) auf der Oberfläche zurück, schließlich aber kann sich das Wasser doch auf der Erdoberfläche halten, und bei weiterer Abkühlung beginnt zunächst im Wasser und dann auch auf dem Lande das organische Leben. „Ein Pflanzenwuchs entfaltet sich in unbeschreiblicher Fülle, weniger großartig tierisches Leben. Aber die stoffreiche Atmosphäre ist noch lange nicht erschöpft. Es treten zeitweise gewaltige Niederschläge ein von Ton-, Kalk-, Quarz-Wassermassen. Ganze Generationen von pflanzlichen und tierischen Gebilden werden überlagert, begraben, um über sich in teilweise ganz neuen Formen, teilweise durch veränderte klimatische und Bodenverhältnisse bedingte Modifikation der Formen neue Generationen entstehen und wieder begraben werden zu lassen." Mit der Abgabe der letzten Ton-, Quarz- und Kalkmassen geht eine bedeutende Temperaturabnahme Hand in Hand, die weder durch die innere Erdwärme, noch durch die Sonne, die etwa bis zur Bildung des Merkur-Ringgebildes fortgeschritten ist und eine gegen heute verhältnismäßig geringe Wärme- und Lichtstrahlung hat, kompensiert wird. Infolge der niedrigen Temperatur gibt die Atmosphäre den größten Teil ihres Wassers ab, die Erdoberfläche wird fast ganz mit Wassermassen bedeckt, während das wenige aus den Meeren herausragende Land bis weit in die heute gemäßigte Zone von Schneefeldern und gewaltigen Gletschern durchzogen ist. Mit der Lichtung

Digitized by Google

der Atmosphäre verringert sich auch ihr Druck auf das Erdinnere. Die Folge davon sind Eruptionen, Durchbrüche und Verwerfungen.

5. Besonnungsepoche: Die Sonne nähert sich mehr und mehr ihrem heutigen Zustande. Ihre Licht- und Wärmestrahlung nimmt zu und bewirkt im allgemeinen ein wärmeres Klima auf der Erde. Es schmelzen die Gletscher und Eisfelder bis in ziemlich hohe Breiten, die Luft vermag infolge ihrer höheren Temperatur wieder größere Wassermengen aufzunehmen, und infolgedessen tauchen große vom Meere bedeckt gewesene Länder aus demselben wieder auf. „Eine zweite Folge ist, daß bis dahin blühende Länder der niederen Breiten nach und nach steril werden, klimatisch weniger günstige, polwärts gelegene einen hohen Grad von Fruchtbarkeit erlangen, gänzlich unbewohnbare, so lange in Eis starrende Länder einigermaßen anbaufähig werden." Mit dem zurückweichenden Eise dringt der schon während der Eiszeit existierende Mensch nach Norden vor und kommt hier zu höherer Kultur. „Wir sind in der Gegenwart angelangt." Die vulkanischen Erscheinungen haben bedeutend nachgelassen und würden vielleicht ganz aufgehört haben, wenn nicht das ins Erdinnere einsickernde und in Dampf verwandelte Wasser von Zeit zu Zeit einen „Ausgleich mit der Atmosphäre" nötig machte.

6. Erstarrungsepoche: Die Abkühlung der Sonne schreitet weiter fort, wodurch gleichzeitig eine allgemeine Temperaturabnahme auf der Erde und ein Vorrücken der Eismassen von den Polen zum Äquator bedingt ist. „Die bewohnbare äquatoriale Zone schrumpft mehr und mehr zusammen; auch sie vereist; der Planet ist für organisches Leben erstorben. In seinem Innern nur pulsiert es noch, doch wie lange? und — wozu? Schon ist infolge des den Raum erfüllenden, Widerstand leistenden Äthers, seine Tangentialbewegung bedenklich ermattet; kleiner und kleiner werden die Kreise, welche er um seinen Mutterball zieht; zu Staub zertrümmert fällt er ihm, dem er entsprossen, wieder anheim."

Toula[53]) S. 45 faßt sein Urteil über die Moldenhauersche Hypothese in dem Satze zusammen: „Glücklicherweise hat die Atmosphäre endlich ihre letzten Ton-, Kalk- und Quarzmassen abgegeben, sie enthält nur noch Wasserdämpfe, sonst wären wir vielleicht noch immer in Gefahr, eines schönen Tages in einen tüchtigen Quarzniederschlag eingehüllt und auf kürzestem Wege versteinert zu werden." Viel mehr läßt sich auch über ein solches Phantasiegebilde, wie das eben erwähnte, nicht sagen, denn es spricht, abgesehen vielleicht von der ersten Epoche, unseren ganzen physikalischen und geologischen Kenntnissen Hohn. Die ganze Sphärenbildung ist in dieser Weise

Digitized by Google

unmöglich, da sich Gase doch nicht nach dem spezifischen Gewicht sondern können. Geradezu vorsintflutlich ist die Ansicht Moldenhauers über die Entstehung der verschiedenen Gesteinsarten und beweist, daß der Verfasser weder von Petrographie noch Geologie auch nur eine Ahnung hat.

Wissenschaftlich ist die Hypothese, das Erdinnere sei gasförmig, zuerst von Ritter[119]) mit Hilfe der mechanischen Wärmetheorie zu begründen versucht worden. Er geht von der Annahme aus, daß das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz für Gase selbst bei den höchsten Drucken und Temperaturen noch Gültigkeit hat. Unter dieser Voraussetzung findet er für eine mit der Erde hinsichtlich der Größe und Massenverteilung übereinstimmende Gaskugel eine zentrale Dichte gleich der 3,91fachen mittleren Dichte. Seine weiteren Berechnungen ergeben im Zentrum einen Druck von 31560 Millionen kg und eine Temperatur von 103400°. Bei einer so enorm hohen Temperatur würden alle auf der Erde vorhandenen Stoffe überkritisch sein, sich also durch keinen Druck verflüssigen lassen. Ritter zieht daraus den Schluß, daß die Erde aus einer festen Kruste und einem gasförmigen Kern bestehe, dessen innerste Partien infolge von Dissoziation die isolierten Grundstoffe bilden. Er kommt ferner noch zu dem merkwürdigen Resultat, daß bei einer der Erde gleich großen Gaskugel Wärmeentziehung keineswegs mit Temperaturabnahme im Innern verbunden ist, sondern daß von der durch die Gravitationsarbeit erzeugten Wärme nur 18,7 % durch Strahlung verloren gehen, während 81,3 % zur Temperaturerhöhung verwendet werden. Dieses Resultat läßt sich aber nicht unmittelbar auf die Erde übertragen, sondern es müßte erst nachgewiesen werden, ob bei ihr Wärmeverlust und daraus folgende Kontraktion mit Temperaturerhöhung verbunden ist oder nicht. Ritter ist der Ansicht, es ließe sich weder dies noch das Gegenteil beweisen. „Die obigen Untersuchungen scheinen daher den Schluß zu rechtfertigen, daß die (auf einer Verwechselung der Begriffe ‚Abkühlung' und ‚Wärmeverlust' beruhenden) bisher gemachten Versuche: die sogenannte Abkühlungsdauer der Erde oder Sonne zu berechnen, als verfrüht und gegenstandslos bezeichnet werden müssen, solange die Vorfrage nicht erledigt ist: ‚ob' überhaupt eine Abkühlung stattfindet oder stattgefunden hat." Aus der jährlichen Abnahme des Sonnenhalbmessers läßt sich ein Schluß auf das Alter der Erde ziehen. Es kann dieses sicher nicht größer sein, als die Zeit, die der Sonnenhalbmesser gebraucht hat, um von der Größe des Erdbahnradius bis auf seine heutige Größe abzunehmen. Unter der Annahme, daß die

Digitized by Google

Intensität der Wärmestrahlung dem Quadrat der absoluten Temperatur proportional ist, ergibt sich als oberer Grenzwert für das Erdalter 7 458 000 Jahre. Wahrscheinlicher ist allerdings, daß sich die Intensitäten der Wärmestrahlung nicht wie die Quadrate, sondern wie die dritten Potenzen der Temperaturen verhalten, und dann ergibt sich 40 Millionen Jahre. Aus diesen Berechnungen folgt ferner noch, daß vor 75 000 Jahren die von der Sonne ausgestrahlte Wärme 1 % weniger betrug als jetzt, und daß dies vielleicht die Ursache der Eiszeit gewesen wäre, „während das der Eiszeit vorausgegangene Tropenklima vielleicht durch Annahme einer vormals geringeren Dicke der festen Erdrinde sich erklären ließe." Von Interesse dürfte aus der Ritterschen Arbeit noch das Kapitel: „Grenzbedingungen für die Möglichkeit des Vorhandenseins einer Atmosphäre" sein. Er findet, daß es für jeden Weltkörper für die verschiedenen Gase je eine Grenztemperatur gibt, bei deren Überschreitung die Gravitationskraft nicht ausreicht, um das Auswandern dieses Gases in den unendlichen Weltenraum zu hindern. Diese Grenztemperatur T_0, auch Dispersionstemperatur genannt, ist für die Erde $T_0 = \frac{A r}{c_p}$, wobei A das mechanische Wärmeäquivalent ist, r der Erdradius und c_p die spezifische Wärme des Gases, aus dem die Atmosphäre besteht, bei konstantem Druck. Für einen Weltkörper mit der Gravitationsbeschleunigung Ng und dem Radius λr lautet die Gleichung $T_0 = \frac{AN\lambda r}{c_p}$. Für eine reine Wasserstoffatmosphäre ergeben sich folgende Werte:

Weltkörper	N	λ	T_0 (absolut)
Erde	1	1	4404,4
Mars	0,382	0,540	908,5
Merkur	0,521	0,378	867,4
Mond	0,164	0,273	197,2

Bei dieser Berechnung ist aber die Rotation und die Anziehungskraft der übrigen Weltkörper außer acht gelassen, zwei Größen, durch deren Berücksichtigung die gefundenen Werte von T_0 noch kleiner werden. Für den Mond reduziert sich der Wert um $^1/_{22}$ und man erhält also $T_0 = {}^{21}/_{22} \cdot 197{,}2 = 188{,}2^0$ abs. Temperatur $= -84{,}8^0$ C.

Die Arbeiten der übrigen Forscher, die gleichfalls für ein gasförmiges Innere eintreten, stützen sich auf die Arbeit Ritters und schließen sich ihr so eng an, daß ich es für geraten erachte, ihren Inhalt erst noch kurz anzugeben, um sie dann gemeinsam einer Besprechung auf die Haltbarkeit der ausgesprochenen Ansichten hin zu unterziehen. Zunächst bekannte sich Zöppritz[120]) in einem Vortrage

Digitized by Google

auf dem I. deutschen Geographentag für ein gasförmiges Innere. Er führte dabei aus, daß die Dichte- und Temperaturbeobachtungen bei der geringen uns erreichbaren Tiefe für das Verhalten in den zentralen Teilen nicht maßgebend sein können, sondern sich vielmehr mit den verschiedensten Ansichten über das Erdinnere vertragen. Aus diesen Beobachtungen sowohl als auch aus denen an Thermen und Vulkanen läßt sich nur auf eine Temperaturzunahme bis wenigstens zum Schmelzpunkt der Gesteine schließen. Die Laven geben uns dagegen keinen Aufschluß über den Zustand des Erdinnern, sondern über diesen können wir nur auf indirektem Wege etwas zu erfahren suchen. Die Abplattung der Erde ist kein Beweis für ein flüssiges Innere, da eine elastische Kugel von der Größe der Erde bei gleicher Rotationsgeschwindigkeit ebenso deformiert wird. Die mittlere Dichte spricht ebenso wie die Präzession für eine Dichtezunahme nach dem Erdinnern; es läßt sich aber daraus ebensowenig ein Schluß auf das Gesetz der Dichtezunahme, wie auf den Zustand der inneren Erdmassen ziehen. Das letztere war allerdings, wie im ersten Teile erwähnt, von Hopkins[52]) versucht worden. Darwin[121]) hat jedoch nachgewiesen, daß nicht die Präzession, sondern die Nutation entscheidend sei. Er kommt aber zu dem gleichen Resultat, daß die Erde einen sehr hohen Grad von Starrheit besitzen muß. Später ist auch von Oppenheim[122]) gezeigt worden, daß sich die Präzessionskonstanten für ein flüssiges und festes Sphäroid nur um unmerkliche Größen unterscheiden. Von nicht geringerer Wichtigkeit, einen Aufschluß über das Erdinnere zu erlangen, als die Präzession und Nutation sind die Gezeiten. Zöppritz führt außer den bereits erwähnten Untersuchungen von Thomson[65, 66]) noch die von Darwin[128]) an. Letzterer fand, daß die Erde viel starrer sein müsse als Pech bei 0^0, und daß sie auch nicht etwa aus einer 100 km dicken Kruste, die ein flüssiges Innere umschließt, bestehen könne, da sie in beiden Fällen der Anziehung von Sonne und Mond fast wie eine Wasserkugel folgen würde. Wäre die Erde starr, so müßten besonders die Gezeiten von langer Periode sehr nahe mit der Theorie übereinstimmen. Die Beobachtungen haben aber gerade das Fehlen von Gezeiten langer Periode ergeben, was sich nur dadurch erklären läßt, daß die feste Erde nicht starr ist, sondern selbst Gezeiten hat. Da aber Fluten kurzer Periode nachgewiesen sind, so kann die Erde auch nicht aus zähflüssigem, inkompressiblen Material bestehen, und es bleiben nach Zöppritz' Meinung nur zwei Auswege offen: „Entweder die Erde muß so fest sein, daß die langperiodischen Gezeiten in sehr verkleinertem Maße, die kurzperiodischen

Digitized by Google

auch in verkleinertem, aber durch die unregelmäßige Gestaltung der Meeresbecken auch zeitlich stark modifiziertem Grade auftreten — und das ist der Schluß, den W. Thomson und Darwin ziehen; — oder aber es gibt einen dritten, vielleicht gasähnlichen Zustand des Erdinnern, dessen Eigenschaften die Verzögerung und Veränderung der Fluten zu erklären gestatten."

Zöppritz schließt sich im großen und ganzen den Ausführungen von Ritter an. Wenngleich auch nach seiner Ansicht das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz nicht während des ganzen Verdichtungsvorganges gültig gewesen ist, so müßte doch die Mittelpunktstemperatur 20000° übersteigen, eine Temperatur, die sicher oberhalb der kritischen Temperatur aller auf der Erde vorkommenden Stoffe liege. Die zentralen Massen werden sich daher im gasförmigen Zustande befinden. Durch die Druckzunahme werden sie bis zu einem Grenzvolumen geführt, wo infolge der Nähe der einzelnen Teilchen alle freie Beweglichkeit aufhören muß, so daß man die ganze Masse nur als starr bezeichnen kann. Sowie jedoch der Druck nachläßt, reagiert die Masse wie ein Gas, und aus diesem Grunde bezeichnet Zöppritz diesen Zustand als gasähnlich. Er glaubt auch durch ein gasähnliches Erdinnere die Aufrichtung der Gebirge besser erklären zu können als bisher. Die Geologen setzen als Ursache der Gebirgsfaltung einen Horizontalschub voraus, der durch die bei der Abkühlung auftretende Kontraktion der einzelnen Schichten bedingt ist. „Die Beträge, die sich hierbei für die Differenz zwischen der Kontraktion der äußeren und inneren Schichten ergeben, scheinen aber zur Erklärung der Gebirgsfaltung nicht genügend zu sein, falls man nicht annimmt, daß der Ausdehnungskoeffizient der Erdmasse nach innen hin beträchtlich wächst. Hierzu ist man nicht berechtigt, falls man die Massen nur als im festen oder im tropfbarflüssigen Zustand befindlich annimmt, weil die Ausdehnungskoeffizienten solcher überhaupt immer sehr klein sind und auch mit steigender Temperatur wenig wachsen. Wenn aber die inneren Massen sich in einem gasähnlichen Zustande befinden, so dürfen wir ihnen auch einen Ausdehnungskoeffizienten von der Größenordnung, wie ihn die Gase haben, zuschreiben, also einen viel bedeutenderen als ihn feste oder tropfbarflüssige Körper besitzen. Damit wird einer der bedenklichsten Gründe gegen die neuere Gebirgsfaltungstheorie beseitigt." Außer den genannten Forschern vertritt auch Günther[96]) S. 354—362; [19]) den Standpunkt, das Erdinnere sei gasförmig. Er nennt seine Hypothese Kontinuitätshypothese und charakterisiert sie kurz so:

Digitized by Google

„Im Innern des Erdballes sind alle überhaupt denkbaren Aggregatzustände zwischen nahezu totaler Starrheit und absoluter Dissoziation vorhanden, und zwar gibt es keine wie immer beschaffenen Trennungsflächen, sondern der Übergang ist ein absolut lückenloser, so daß zwei nächst benachbarte, unendlich dünne Kugelschalen auch hinsichtlich ihrer Molekularbeschaffenheit einen wenn auch noch so geringen Unterschied aufweisen müssen." Günther unterscheidet folgende 7, wie er jedoch ausdrücklich sagt, nicht voneinander getrennte, sondern lückenlos ineinander übergehende Zonen:

1. Die feste Kruste.
2. Die Zone der latenten Plastizität.
3. Das Magma.
4. Die Zone gewöhnlicher Flüssigkeit.
5. Zone der gewöhnlichen Gase.
6. Zone der überkritischen Gase.
7. Zentralball des einatomigen Gases.

Mit diesen eben erwähnten Hypothesen kann ich mich aus verschiedenen Gründen nicht einverstanden erklären. Zunächst ist es sehr wahrscheinlich, daß eine solche Anwendung des Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetzes nicht erlaubt ist, da sich schon bei den uns zu Gebote stehenden hohen Drucken und Temperaturen bedeutende Abweichungen zeigen. Während nun Ritter stets betont, daß seine ganzen Ableitungen nur unter dieser Voraussetzung gelten, ohne Rücksicht darauf, ob sie wirklich erfüllt ist, behaupten sowohl Günther als Zöppritz, es sei von Ritter der gasförmige Zustand des Erdinnern bewiesen worden. Sehen wir aber jetzt einmal davon ab, daß die Voraussetzungen nicht ganz richtig sind und betrachten die daraus gezogenen Schlüsse. Ritter berechnet eine Zentraltemperatur von 103 400°, eine Temperatur, von der wir uns einerseits durchaus keine Vorstellung machen können, deren Existenzerklärung mir aber andererseits auch durchaus unverständlich ist. Diese Temperatur kann von der ursprünglichen bei der Kontraktion der Gasmassen zu Dämpfen und Flüssigkeiten erzeugten Wärme nicht mehr übrig sein, da infolge der in diesen Gasen auftretenden Strömungen eine ziemlich gleichmäßige Wärme geherrscht haben muß und bei einer so hohen Temperatur an eine Kondensation nicht zu denken ist. Sie kann aber auch nicht etwa nachträglich entstanden sein durch die Wärme, welche durch die Kontraktion der äußeren Kruste bei der Abkühlung erzeugt wird, denn sonst müßte ja unsere Erde immer heißer werden, was unseren ganzen Erfahrungen widerspricht. Ganz unbegreiflich ist auch, daß von der durch die Kontraktion der äußeren Kruste

Digitized by Google

erzeugten Wärme nur 18,7 % ausgestrahlt werden sollen und 81,3 % zur Temperaturerhöhung des Erdinnern dienen sollen. Es wäre dann erstens überhaupt kein Grund zu weiterer Kontraktion vorhanden, und zweitens wäre dies ja eine Wärmeerzeugung aus nichts. Die ausgestrahlte Wärme und die bei der Kontraktion geleistete Arbeit kann sicher nicht größer sein, als die ursprünglich in diesem ganzen System vorhanden gewesene Energie, während nach Ritter die Kruste nach außen Wärme abgibt, bei der Kontraktion Arbeit leistet und das Innere noch erhitzt. Da alle übrigen Folgerungen aus denselben Formeln abgeleitet sind, so sind auch sie mit großer Vorsicht aufzunehmen.

Aus den gleichen Formeln berechnete Ritter das Erdalter zu 40 Millionen Jahre. Wie stimmt dieser Wert mit denen anderer Forscher überein? Wir hatten schon gesehen, daß Thomson[66]) als Grenzwerte 20 und 400 Millionen Jahre und als wahrscheinlichsten Wert 100 Mill. Jahre angibt.

Außer einer Entgegnung[164]) auf eine Notiz von Perry[165]), daß die Erstarrung der Erde vor mehr als 400 Millionen Jahren begonnen habe, hat Thomson im Jahre 1899 noch eine größere Abhandlung über das Erdalter geschrieben[166]); [77]), 1900 Nr. 23. Nach einem geschichtlichen Überblick bestimmt er den oberen Grenzwert für das Erdalter zunächst aus der Abplattung. Da vor 7000 Mill. Jahren die Umdrehungsgeschwindigkeit doppelt so groß war, so kann die Erde nicht schon fest gewesen sein, da sonst die Abplattung viel größer sein müßte; wahrscheinlich war sie vor 1000 Millionen Jahren noch nicht fest, sicher vor 5000 Millionen Jahren. Viel engere Grenzen, 20—40 Millionen Jahre, für das Alter der erstarrten Erde ergeben Berechnungen über die Wärmeausstrahlung. Schon wenige Jahrhunderte nach der Erstarrung wäre die Oberfläche für organisches Leben geeignet gewesen, wenn nicht infolge der geringen Sonnenwärme ein größerer Zeitraum nötig gewesen wäre; es ergeben sich daher 20—40 Millionen Jahre für das Bestehen der festen Erde und 20—30 Millionen Jahre für das des organischen Lebens. Clarence King[124]) hat das Erdalter mit Hilfe der Untersuchungen von Barus[143b]) über die Abhängigkeit des Schmelzpunktes beim Diabas vom Druck zu bestimmen gesucht. Er berechnete nach dem Laplaceschen Dichtegesetz den Druck für verschiedene Tiefen und durch Extrapolieren der Barusschen Werte den zugehörigen Schmelzpunkt und erhielt dabei folgende Tabelle:

Digitized by Google

Erdradius	Druck in Atmosphären	Schmelzpunkt C°
1,000	0	1 170
0,995	8 600	1 380
0,990	17 400	1 600
0,985	26 400	1 830
0,980	35 600	2 060
0,960	74 500	3 030
0,940	116 400	4 080
0,920	162 000	5 210
0,9	199 000	6 100
0,8	497 000	14 000
0,6	1 260 000	33 000
0,4	2 100 000	54 000
0,2	2 770 000	71 000
0,0	3 020 000	76 000

Nun trug er die Werte für die Schmelzpunkte und die Längen des zugehörigen Radius als Ordinaten bezgl. Abszissen in ein rechtwinkliches Koordinatensystem ein und für dieselben Radien auch die Temperatur des Erdinnern, wodurch er zwei Kurven erhielt, deren gegenseitiges Verhalten über den Zustand des Erdinnern Aufschluß gibt. Es können nämlich drei Fälle eintreten: Entweder die Schmelzpunktskurve liegt oberhalb der Temperaturkurve, dann ist die ganze Erde fest; oder die zwei Kurven schneiden sich nur einmal, sodaß für größere Tiefen die Temperaturkurve oberhalb der Schmelzkurve bleibt, dann ist der Teil von der Oberfläche bis zum Schnittpunkt fest und das Innere flüssig; 3. können sich die Kurven zweimal schneiden, dann besteht die Erde aus einer festen Kruste, flüssiger Zwischenschicht und festem Kern. Nach des Verfassers Ansicht können für die Erde nur der erste und dritte Fall in Betracht kommen, da nur mit diesen beiden die für die Erde bewiesene Starrheit in Einklang zu bringen sei. Unter dieser Voraussetzung zeichnet King die Temperaturkurve für bestimmte Temperaturgradienten und kann so einen Schluß auf das Erdalter ziehen, für dessen wahrscheinlichsten Wert er 24 Millionen Jahre hält. So geistreich die ganze Art der Berechnung ist, so gewagt ist es, aus Beobachtungen bei so geringen Drucken und Temperaturen Schlüsse auf die Verhältnisse im Erdinnern zu ziehen. Fisher[125]) wendet gegen diese Berechnung auch ein, daß die Starrheit der Erde selbst noch so wenig bekannt sei, daß es unzulässig wäre, auf so unsicherer Grundlage noch weitere Schlüsse aufzubauen. Rudzki[167]) benutzt die jährliche Verkürzung des Erdradius, um das Alter zu berechnen. Diese hängt hauptsächlich vom Wärmeleitungs- und Ausdehnungskoeffizienten ab, zwei Größen, über die wir bei den im Erdinnern herrschenden Druck- und Temperaturverhältnissen nur sehr ungenaue Näherungswerte besitzen. Hätte sich, wie Neumayer annimmt, der

Digitized by Google

Radius seit dem Silur um 5 km verkürzt, so würden ungefähr 100 Millionen Jahre vergangen sein. In einer zweiten Arbeit findet er als Grenzwerte für das Erdalter 972 Millionen und 62,2 Millionen Jahre. Gänzlich wertlos ist ein Versuch von Joly[168]) das Erdalter zu bestimmen. Er berechnet die im Meerwasser enthaltene Natriummenge, ferner die jährlich dem Meere zugeführte Menge Natrium und behauptet, der Quotient beider gäbe das Alter der ältesten Sedimente an. Er vergißt aber dabei vollständig, wie Tornquist[168c]) in seinem Referat bemerkt, daß noch eine große Anzahl Faktoren mitsprechen, deren Einfluß gar nicht zu schätzen ist, wodurch die ganze Rechnung wertlos wird.

Im Jahre 1900 veröffentlichte Kövesligethy[126]) eine Abhandlung, in der er das Erdalter mit Hilfe der mechanischen Wärmetheorie zu berechnen sucht. Er geht von der Kant-Laplaceschen Theorie aus, wonach zur Zeit der Entstehung unserer Erde die Sonne noch bis zur jetzigen Erdbahn reichte. Unter dieser Voraussetzung berechnet er aus dém Gaszustand der Sonne und deren heutiger Größe das Alter der Erde zu 19,87 Mill. Jahren. Auf ganz anderem Wege hat Soddy[127]) das Erdalter zu ermitteln versucht. Während sich bisher meist das von den Physikern berechnete Erdalter für die Forderungen der Biologen und Geologen zu klein erwiesen habe, würde diesem Übelstand durch die „Entdeckung des in gewissen Atomstrukturen latenten ungeheuren Vorrats von nutzbarer Energie sowie das mutmaßliche Vorhandensein dieser Energie in allen Atomen" abgeholfen. Der Grund, weshalb diese Berechnung zu klein ausfiel, liege jetzt klar auf der Hand, man kannte eben nicht alle während dieser Zeit wirksamen Gesetze. „Durch die Radioaktivität ist eine unabhängige Grenze für die Vergangenheit der Erde gesetzt, da wir von einem gleichzeitig verlaufenden Prozeß der Rekonstruktion der Elemente gegenwärtig keine Kenntnis haben." Unter der Annahme, daß ein solcher Prozeß während der letzten 10000 Mill. Jahre nicht stattgefunden hat, ergibt sich für das Alter der radioaktiven Mineralien die mittlere Lebensdauer der Elemente Uran und Tor. Es müßten also alle Mineralien, die eine größere Menge Uran enthalten, während der mittleren Lebensdauer dieses Elementes, die zwischen 10^8 und 10^{10} Jahre liegt, entstanden sein. Selbst wenn die ganze Erde aus Uran bestanden hätte, so ergebe sich aus der zu verschiedenen Zeiten übrigen Menge des Urans ein Erdalter von höchstens 10^9 bis 10^{10} Jahren. Ziehen wir noch die Resultate der Biologie und Geologie in Betracht, so erscheint mir der s. Z. von Thomson berechnete

Digitized by Google

Wert, 100 Millionen Jahre, der beste zu sein, wobei es jedoch auf ein paar Millionen mehr oder weniger nicht ankommt.

Wie wir auf S. 57 gesehen haben, versucht Ritter auch eine Erklärung für die Eiszeit zu geben, diese ist aber unzureichend, denn er könnte auf diese Weise allenfalls nur eine Eiszeit erklären, während doch jetzt festgestellt ist, daß schon in karbonisch-permischer Zeit eine große, besonders die südliche Halbkugel betreffende Vereisung stattgefunden hat[98]). S. 70.

Die bis heute einzig brauchbare Erklärung der Eiszeiten ist die von Arrhenius und Frech[177]) gegebene, daß nämlich das Klima unserer Erde durch den Gehalt der Luft an Kohlensäure und Wasserdampf wesentlich beeinflußt wird, da diese beiden Stoffe in großem Maße die Fähigkeit besitzen, die Wärmestrahlen zu absorbieren.

Auch zur Erklärung der Gebirge brauchen wir kein gasförmiges Innere. Hergesell[174]) hat nämlich die Vorgänge bei der Abkühlung der Erde untersucht und kommt zu folgenden interessanten Resultaten: Ohne spezielle Voraussetzungen über die Anfangstemperatur und die Temperaturverteilung ergeben sich bei der Abkühlung zwei Kräfte, die eine wirkt als radiale Kompression; sie wächst im Laufe der Abkühlung, erreicht zu einer bestimmten Zeit ihr Maximum, um dann wieder abzunehmen und nach Vollendung der Abkühlung den Wert 0 anzunehmen. Die andere Kraft wirkt in tangentialer Richtung und nimmt gleichfalls erst zu und dann ab. Im Verlaufe der Abkühlung befindet sich also jede Fläche einmal im Maximum der Kompression und im Maximum der Dilatation, während dann beide Größen wieder abnehmen. Daraus ist aber ersichtlich, daß die Erde im Jugendalter keine Faltengebirge gehabt haben kann, sondern höchstens Verwerfungsgebirge. Denn sobald die Dilatation die Festigkeitsgrenze der äußersten Schichten überschritt, müssen Spalten entstanden sein, an denen allerdings Verwerfungen möglich waren, vorerst jedoch keine Faltungserscheinungen. Diese Spalten können nun auf zwei Arten ausgefüllt sein; entweder presste der radiale Druck von innen Material hinein und füllte sie aus, oder die vorher gespannten Schichten füllten sie durch Verminderung des Gesamtvolumens beim Zusammenschrumpfen wieder aus. Im ersteren, wahrscheinlich am häufigsten auftretenden Falle werden sich die Schichten beim Nachlassen der Spannung, infolge der Verminderung des Gesamtvolumens, wölben und in Falten legen

Digitized by Google

und auf diese Weise lassen sich unsere Faltengebirge auch ohne die Annahme eines gasförmigen Erdinnern erklären.

Ebensowenig sind die von Zöppritz angeführten Beobachtungen der kosmischen Physik ein Beweis dafür, daß das Erdinnere gasförmig sei. Es ist allerdings nicht zu leugnen, daß sie einem gasförmigen Innern nicht widersprechen, aber sie erbringen nur den Beweis, daß sich die Erde äußeren Einflüssen gegenüber wie ein sehr unnachgiebiger Körper verhält, daß sie also nicht aus einem flüssigen Innern, umgeben von einer dünnen Kruste, bestehen kann. Zu dem gleichen Resultat kommt Günther[96]) S. 234 bezüglich der Beobachtungen über die Konstanz des Sterntages. „Man kann sich, mag auch im Erdinnern eine Vielzahl verschiedener Molekularzustände obwalten, doch eine Anordnung der einzelnen Stoffe denken, welche in mechanischer Beziehung den Erdkörper so gut wie starr und homogen erscheinen läßt." Auch die geringen Werte, die für die Verlegung der Erdachse im Innern des Erdkörpers beobachtet sind, lassen sich nur unter der Annahme einer ziemlich hohen Starrheit mit den von Darwin[128]) und Schiaparelli[129]) berechneten in Einklang bringen.

b) Flüssiger Zustand.

Die vorhergehenden Betrachtungen ergeben also, daß ein gasförmiges Erdinnere bis jetzt weder bewiesen ist, noch durch die Entstehung der Erde nach der Kant-Laplaceschen Theorie, noch durch sonst eine Beobachtung gefordert wird. Wir wenden uns daher jetzt zu den Hypothesen, die ein flüssiges Erdinnere annehmen. Falb[130]) führt zunächst die Tatsachen an, die dafür sprechen, daß die Erde einst sehr heiß und flüssig war und daß die Erstarrung durch Abkühlung vor sich gegangen sei und sucht dann zu beweisen, daß das Erdinnere auch jetzt noch teilweise flüssig ist, da die inneren Erdmassen nach dem Gesetze einer Flüssigkeit angeordnet seien, und die Form und Lagerung der Schichten nur durch die Gravitation und Rotation bedingt sei. Auf diese Voraussetzungen gründet Falb seine Theorie der Erdbeben und Vulkaneruptionen. Aus den an der Oberfläche beobachteten Gezeiten der Meere schließt er auf analoge Vorgänge im flüssigen Erdinnern. Der dabei vom flüssigen Erdkern auf die feste Kruste ausgeübte Druck soll sich an der Oberfläche in Erdbeben und Vulkanausbrüchen äußern, eine Ansicht, die wir heutzutage nicht mehr teilen[175]). Großes Aufsehen erregte die von Mallet[131, 132]) aufgestellte Hypothese über die vulkanische Kraft. Er weist zunächst die „chemische Theorie" zur Erklärung des Vulkanis-

Digitized by Google

mus zurück, indem er ausführt, daß Wärme z. T. in chemische Arbeit umgesetzt werden könne, aber nicht umgekehrt chemische Kraft in Wärme. [!?] Mallet selbst tritt für die „mechanische Theorie" ein, welche die Erde als flüssige Masse, umgeben von einer festen, sich bei der Abkühlung kontrahierenden Rinde voraussetzt. Die Abkühlung war an den Polen am größten, und infolgedessen begann auch von hier aus die Krustenbildung, bei der er folgende vier Perioden unterscheidet:

„1. Stadium: Bildung und Umbildung einer dünnen biegsamen Kruste und damit Gestaltung der Oberfläche der zähen oder flüssigen Schichten darunter, welche schon die Grenzen von Land und Meer vorbildete.

2. Stadium: Das Zersplittern und Aufbrechen dieser Kruste und die schnellere aber unregelmäßige Erkaltung, welche durch den ersten teilweisen Niederschlag des Wassers auf der Erde bewirkt wurde, während noch ein großer Teil der Oberfläche sogar rotglühend sein mochte und mit dem zähen Innern noch teilweise die Verbindung offen stand. Diese Vorgänge waren begleitet von einzelnen lokalen Spannungen und Kompressionen.

3. Stadium: Zunahme der Erstarrung in der verdickten Kruste, die fähig wurde den tangentialen Druck, der durch die Kontraktion erzeugt wurde, fortzupflanzen. Dieser umgesetzt, wie wir gesehen haben, erhob die Bergketten und gestaltete die hypsometrischen Formen des Festlandes, begründete das Reich des Ozeans und der Wasserläufe der Welt und hiermit die ersten Anfänge der Klimate, die einer Entwicklung der Lebensformen günstig waren.

4. Stadium: Die Epoche einer außerordentlich dicken und starren Kruste mit verhältnismäßig langsam fortschreitender Erkaltung der Erdkugel, die Herrschaft der Vorgänge, wie sie noch fortdauern, des Spieles der durch fortschreitende Erkaltung bewirkten Kräfte der Kontraktion, von denen wir zu zeigen hoffen, daß aus ihnen vulkanische Tätigkeit ihren Ursprung nimmt und anscheinend unverändert, wenn auch mit stets abnehmender Kraftäußerung sich erhält" [131b], S. 155, 156.

Bei Beginn der Erkaltung wäre die Kruste durch Kontraktion stark deformiert, und es bildeten sich durch die Faltungen Linien geringsten Widerstandes, in deren Nähe das Gestein bis zu großen Tiefen in eng aneinander gepreßte Bruchstücke verwandelt sei. Auch jetzt noch kontrahiere sich die Kruste infolge der säkularen Abkühlung. Dadurch würde eine Kompression der festen Rinde bewirkt, und durch den Druck, den die Gravitation der Kruste auf den sich

Digitized by Google

zusammenziehenden Kern ausübt, würde das Material längs der Linien geringsten Widerstandes zerdrückt. Die bei diesen Vorgängen geleistete Arbeit werde in Wärme umgesetzt, die sich an den Druck- und Zerquetschungsstellen bis zur Rotglut und Gesteinschmelze steigern könne. Es entsteht also die vulkanische Hitze nicht durch Verbindung mit dem flüssigen Innern oder isolierten Lavaseen, sondern durch die bei der Zerquetschung der Kruste in Wärme umgesetzte mechanische Arbeit. Mallet definiert daher die vulkanische Tätigkeit folgendermaßen: „Die Wärme, aus der die vulkanische Tätigkeit der Erde sich gegenwärtig herleitet, wird in der festen Erdrinde durch Umsetzung der mechanischen Arbeit der Zusammendrückung oder der Zerquetschung der Teile dieser Rinde lokal erzeugt. Diese Zusammendrückungen und Zerquetschungen werden durch die schnellere Kontraktion des heißen Erdkerns infolge der Erkaltung und durch das mehr oder weniger freie Nachsinken der Kruste durch ihre Schwere bewirkt. Die vertikale Wirkung der Kontraktion löst sich hierbei in tangentiale Pressungen und Bewegung im Innern der Erdrinde selbst auf“ [131 b]), S. 162. Die Größe der Temperaturerhöhung sei von der Zusammendrückbarkeit, Wärmeleitungsfähigkeit und dem verschiedenen Nachgeben der einzelnen Schichten abhängig, und dies sei auch der Grund für die so ungleichen geothermischen Tiefenstufen, die Hopkins aus der ungleichen Wärmeleitungsfähigkeit der Gesteine nicht zu erklären vermochte. Die vulkanische Tätigkeit sei also unabhängig davon, wie heiß die Erde einst war, wieviel Zeit seitdem vergangen ist, wie hoch die innere Temperatur jetzt ist, ob der Kern noch flüssig oder fest und ob die Kruste dünn oder dick ist; es sei außer der Gegenwart von Wasser nur nötig, daß das Erdinnere wärmer sei als die Oberfläche und daß sich die Erde abkühle. Da die Gegenwart des Wassers zum Zustandekommen der vulkanischen Erscheinungen nötig sein soll, so könnten sie erst seit jener Zeit existieren, als sich die Oberfläche soweit abgekühlt hatte, daß sich flüssiges Wasser auf ihr halten konnte. Wann dieser Zeitpunkt eintrat, ist genau nicht festzustellen, wahrscheinlich jedoch nicht viel über die Sekundärzeit hinaus. Vorher äußerte sich der Vulkanismus in Ergüssen flüssiger Gesteinsmassen. Mallet sucht nun klarzulegen, daß unter den in der Natur gegebenen Bedingungen die zur Erklärung der vulkanischen Erscheinungen nötige Wärme wirklich entstehen kann, und daß die so entstehende Wärme auch ausreichend ist. Zu diesem Zwecke weist er zunächst durch Rechnung nach, daß die Schwere der nicht unterstützten festen Erdrinde genügt,

Digitized by Google

um alle Gesteine, die sie zusammensetzen, zu Pulver zu zermalmen. Hierauf stellt er Untersuchungen an über die Größe der Kontraktion von Mineralmassen zwischen der Schmelztemperatur und der mittleren Temperatur unserer Atmosphäre und findet, daß Hochofenschlacken, die nach seiner Meinung eine den Basalten ähnliche Zusammensetzung haben, eine Kontraktion von kaum 6 % erleiden, während Bischof 20—25 % angibt. Noch geringer soll die Kontraktion bei sauren Silikatgesteinen sein, wie die Versuche an englischem Spiegelglas ergaben. Es bleibt noch übrig zu zeigen, daß die durch die Zerdrückung der Kruste hervorgebrachte Wärme für die vulkanischen Erscheinungen ausreicht.

„1. Wärme wird in Erhebungs- und Auswurfsarbeit umgewandelt.

2. Wärme wird zum Schmelzen oder zur Erhitzung von festen Auswurfsmassen verwendet.

3. Wärme wird in der Form von Dampf etc. an den vulkanischen Ausbruchsstellen verzehrt und ausgestrahlt“ [131b]) S. 227.

Setzt man im Durchschnitt die Vulkane einem Kegel von einer Meile Höhe und 5 Meilen Durchmesser gleich, so ist ihr Volumen 6,54 Kubikmeilen. Berücksichtigt man, daß die Hauptmasse Asche, Lapilli und Schlacken sind, und daß die Laven von nur untergeordneter Bedeutung sind, so ergibt sich für das spezifische Gewicht höchstens 2 und für das Gewicht des ganzen Kegels 48 133 730 304 Tonnen. Um diese Masse aus einer Tiefe von 10 Meilen zu heben, ist die Wärmemenge nötig, die bei der Zerdrückung von $^8/_9$ Kubikmeilen Gestein entsteht. Zur Erhitzung und Schmelzung der ausgeworfenen Gesteinsmassen werden 15,636 Kubikmeilen zerdrückten Gesteins verbraucht. Der unter 3. angegebene Wärmeverlust entspricht 2,664 Kubikmeilen, so daß nach Mallet für einen Vulkan rund 18 Kubikmeilen zerdrückten Gesteins nötig sind. Nimmt man mit Humboldt 400 tätige Vulkane an, so genügen 7200 Kubikmeilen zermalmten Gesteins zu ihrer Bildung. Da 987 Kubikmeilen zermalmten Gesteins dem jährlichen Wärmeverlust der Erde entsprechen, so könnten sie, wenn sie ganz auf die vulkanische Tätigkeit verwandt würden, sämtliche Vulkankegel in weniger als acht Jahren bilden. Mallet glaubt durch seine Ausführungen wahrscheinlich gemacht zu haben: „1. daß die Zermalmung der festen Erdrinde ein hinlänglich hohes Maß von Kraft liefert, um die terrestrische vulkanische Tätigkeit daraus herzuleiten und 2. daß die nötige Menge von zermalmtem Gesteine innerhalb der Grenzen bleibt, welche als der durch säkulare Erkaltung geschehenden Kontraktion entsprechend gelten können.“ „Ein erstes Charakteristikon der hier vorgetragenen Ansicht über vulkanische Tätigkeit ist darin zu sehen, daß dieselbe

Digitized by Google

UNIVERSITY OF CALIFORNIA

nur als eine Phase einer einzigen, stets in Wirksamkeit gewesenen Kraft anzusehen ist, einer Kraft, die an Intensität allerdings immer abnahm, seit unser Planet im gasförmigen Zustande war“[131b]) S. 239. Wasser, das zum Zustandekommen der vulkanischen Erscheinungen nötig sei, könnte nur dann bis zum flüssigen Kern eindringen, wenn die äußere Kruste nur eine Dicke von 30—50 Meilen hätte, was mit allen übrigen Beobachtungen nicht in Einklang zu bringen ist. Bei einer Kruste von 300—800 Meilen ist es unmöglich, daß Wasser je den flüssigen Kern erreicht; ferner sprechen auch alle übrigen Erscheinungen dafür, daß der Entstehungsort der vulkanischen Kräfte durch Zusammentreffen von Wasser und hoher Temperatur nicht in großer Tiefe unter dem Ausbruchspunkt liegen kann, wie aus der Richtung der Stöße bei Eruptionen hervorgehe. Das Erregungszentrum dieser Stöße fällt ungefähr mit dem Vulkanherde zusammen. Daher müßten die Stoßwellen in der Nähe des Vulkans, wenn sie aus großer Tiefe kämen, vertikal erscheinen, während alle Beobachtungen viel eher für horizontale Wellen sprechen. Da ferner die Gesteinszermalmung eine nur lokale Erscheinung ist, so würde dadurch auch die Nichtperiodizität und das Verlöschen der Vulkane erklärt werden. Die Zermalmung kann nur an den Stellen des geringsten Widerstandes stattfinden, und so käme es, daß die Vulkane im allgemeinen reihenförmig angeordnet sind, und daß sie den großen Bergketten folgen.

Das merkwürdigste an Mallets Theorie ist nach Roth[132]) S. 565—573, wie schon Poulett Scrope hervorhob, daß er in der Erde zwei Wärmequellen annimmt, nämlich die Eigenwärme und die durch die Gesteinszermalmung entstehende. Am auffallendsten ist aber, daß nach seiner Berechnung nur $^1/_{1600}$ der Gesamtwärme für Vulkane verwendet wird, und daß dieses eine eigene Wärmequelle hat, während die übrigen $^{1599}/_{1600}$, die durch Strahlung verloren gehen und für die Thermen nötig sind, vom heißen Kern geliefert werden. Selbst wenn man zugibt, daß die für die Vulkane nötige Wärme durch Gesteinszermalmung geliefert wird, so reicht die so entstandene Wärme nur dann aus, wenn die Zerdrückung unter den günstigsten Bedingungen vor sich geht, d. h. plötzlich und ohne Fortführung von Wärme; ferner dürfte sich der Widerstand des zu zermalmenden Gesteins nicht durch die selbst bei der Annahme sehr geringer Tiefe für den Vulkanherd ergebende Temperaturzunahme verringern. Die in späten geologischen Epochen auftretenden Hebungen und Senkungen, die doch auch mit Reibung und Zerdrückung verbunden sind, haben keine Vulkane hervorgebracht. So sind z. B. Teile

Digitized by Google

von Großbritannien um 1300—2000 Fuß gehoben worden, wie sich aus Glazialerscheinungen nachweisen läßt, ohne eine Spur von vulkanischen Erscheinungen zu zeigen. Ein Beweis gegen Mallets Theorie ist dies jedoch nicht, da diese Bewegung keine instantane, sondern eine säkulare war. Mallet erklärt weder diese Erscheinungen, noch die vielfach beobachteten Oszillationen des festen Landes, er spricht nur von Senkungen der festen Kruste gegen den schwindenden Kern. Auch von den Bergketten läßt sich nachweisen, daß sie größtenteils nicht auf einmal gehoben worden sind, und daß sie, da die Hebung keine instantane war, nicht zur Schmelzung von Gestein führen konnten, also auch keine Vulkane hätten liefern können. Es gibt daher auch Hebungen und Faltungen genug, ohne daß gleichzeitig Eruptivgesteine aufträten, wie z. B. im Schweizer Jura. Mallet verlegt die vulkanische Tätigkeit in geringe Tiefen. Es müßten infolgedessen die Laven eine gleiche Zusammensetzung haben, wie die dort vorkommenden Sedimente, und ferner müßten sich an den Sedimenten Erhitzungen und Einschmelzungen zeigen, was aber beides nicht der Fall ist. Roth erblickt auch darin einen Beweis gegen Mallets Theorie, daß vor dem Tertiär keine Vulkane auftreten. (Wenn uns auch die Vulkankegel aus jener Zeit nicht mehr erhalten sind, so haben wir doch noch die von den Vulkanen ausgeworfenen Tuffe!) Wäre wirklich die bei der Gesteinszerdrückung entstandene Wärme die Ursache des Vulkanismus, so müßten nach seiner Meinung Vulkane existieren, seit sich flüssiges Wasser auf der Erde halten konnte und zwar besonders im Paläozoikum und in der Sekundärzeit, da damals die Bedingungen besonders günstige waren. Denn zu jenen Zeiten wäre die Kontraktion der Erdkruste eine viel größere gewesen und daher auch die Gesteinszermalmung; außerdem haben sich sicher damals mehr Spalten und Risse gebildet als in späteren Zeiten. „Der Einwand, daß in dieser ersten Zeit alle durch die Kontraktion gelieferte Arbeit zur Hebung der Bergketten verwendet sei, ist nicht stichhaltig, denn in der Tertiärzeit, wo die Kontraktion nur noch sehr gering sein konnte, wurden mächtige Bergketten (Alpen, Pyrenäen, Anden) zu großen Höhen gehoben und die Vulkane gebildet.“ Nicht haltbar ist die Behauptung, die Vulkane folgten den Küsten und großen Gebirgen. Zu dieser Ansicht scheint Mallet allein durch die Beobachtung von Amerika (Anden) veranlaßt zu sein. Denn weder das am meisten gehobene Land, das Hochland von Innerasien, noch die Alpen und viele andere Gebirge haben Vulkane, die mit ihnen in direktem Zusammenhang stehen. Außerdem ist an die erloschenen Vulkane, wie z. B. Eifel, Rhön etc. nicht gedacht.

Digitized by Google

Roth schließt seine Kritik mit dem Satze: „Faßt man alles zusammen, so erscheint es weder bewiesen, daß durch die Zerdrückung der Gesteine und durch die daraus vermittelst Umsetzung gewonnene Wärme die vulkanische Tätigkeit bedingt werde, noch ist der Nachweis geliefert, daß die bisherigen Theorien so unzureichend seien, um die Annahme einer neuen Ursache notwendig erscheinen zu lassen. Die hohe Temperatur des Erdinnern und der Zutritt des Wassers zu demselben mittelst Kapillarspalten genügen, wenn auch nicht alles auf genaue Zahlen zurückgeführt werden kann, zur Erklärung der explosiven vulkanischen Erscheinungen.“ Auch Lang[131c]) schließt seinem Referat über die Malletsche Arbeit eine kurze Kritik an. Er macht zunächst darauf aufmerksam, daß Mallet keine Erklärung dafür gibt, wie sich die feste, spezifisch schwerere Kruste an der Oberfläche halten konnte, ohne unterzusinken; denn die von Mallet zwischen dem flüssigen Kern und der festen Kruste angenommene zähflüssige Schicht hilft über diese Schwierigkeit nicht hinweg, da sie zwar spezifisch schwerer ist als der Kern, aber doch leichter als die äußere Schale. Lang hat gerade diesem Punkte eine größere, gleich noch näher zu besprechende Arbeit gewidmet. Im weiteren Verlaufe seiner Ausführungen wendet er sich gegen die Annahme, daß die Anwesenheit von flüssigem Wasser auf der Erdoberfläche für den Vulkanismus in der Form, wie er sich heute äußert, unbedingt nötig sei. Ferner verlege Mallet diesen Zeitpunkt, wo sich flüssiges Wasser auf der Erde halten konnte, in eine viel zu späte Epoche, da wir doch schon vor der Sekundärzeit sicher nachweisbare Sedimente haben. Daß uns keine Vulkankegel aus jenen Zeiten mehr erhalten sind, kann uns, wie Lang sehr richtig bemerkt, bei der leichten Verwitterbarkeit dieser Materialien nicht verwundern. Dieser Vorwurf trifft Roth, der diese Art von Vulkanismus sogar erst in die Tertiärzeit verlegt, da vorher keine Vulkankegel nachweisbar sind, noch mehr als Mallet. „Wenn Mallet als wesentliches Erfordernis des Vulkanismus das Wasser betrachtet, so dürfte er konsequenterweise die Mondoberfläche gar nicht als Spiegelbild großer vulkanischer Tätigkeit anerkennen; denn wenn hier diese ohne Wasser erfolgen konnte, ist es gar nicht zu erkennen, warum bei unserer Erdvulkanizität das Wasser unentbehrlich sein soll.“ Obgleich ich ja an die Mitwirkung des Wassers durch Eindringen von der Oberfläche auch nicht glaube, sondern es für wahrscheinlich halte, daß das heute vorhandene Wasser ursprünglich gar nicht etwa alles in der Atmosphäre vorhanden, sondern zum großen Teil in den Magmen gebunden war, so halte ich doch diesen Einwand Langs für sehr gewagt, da zwar die heutige Mondober-

Digitized by Google

fläche kein Wasser hat, womit jedoch keineswegs der Beweis erbracht ist, daß in den Mondlaven nicht ebensogut Wasser gewesen wäre, wie in den Laven auf der Erde.

Den Todesstoß versetzt Lang der Malletschen Hypothese durch den Nachweis, daß die zugrunde liegende mathematische Formel falsch ist. Auch die Experimente über das Verhalten der Silikate beim Erstarren hält er für unzureichend und ist der Ansicht, daß sich bei weiterer Verbesserung der Betrag für die Kontraktion beim Festwerden nicht nur nicht noch weiter verringert, sondern daß man im Gegenteil eine Ausdehnung finden wird. „Es ist also, um kurz zu wiederholen, Mallets Hypothese verwerflich, weil sie auf fraglichen Voraussetzungen, einer unrichtigen mathematischen Formel und nichtssagenden Experimenten beruht." Lang[183]) geht bei seinen Betrachtungen über die Bildung der Erdkruste von der Annahme aus, daß die Erde einst aus konzentrischen, nach dem spezifischen Gewicht angeordneten Magmaschalen bestanden habe, und daß die Erstarrung infolge der Abkühlung an der Oberfläche begonnen habe. Hierauf sucht er ein Bild zu geben, wie diese Erstarrungsprodukte beschaffen waren, und an welchem Orte sie sich zuerst dauernd halten konnten. Hätten die festen Krustenteile ein größeres spezifisches Gewicht als das flüssige Magma, so würden sie untersinken, dabei in heißere Schichten kommen und wieder schmelzen. Dieser Vorgang würde sich solange wiederholen, bis die ganze Masse weit genug abgekühlt wäre, daß sich ein fester Kern bilden könnte, um den dann in relativ kurzer Zeit die ganze übrige Masse kristallisieren würde. „Der Annahme dieser Theorie aber stehen die Erscheinungen des Vulkanismus entgegen, die für einen Wärmeherd im Erdinnern, ein flüssiges Erdinnere sprechen". Bei dem gleichen Erstarrungsvorgang wie eben könnte man die nach dem Erdinnern beobachtete Temperaturzunahme als die Folge der Abkühlung des festen Kerns betrachten, wobei die vulkanischen Erscheinungen durch Magmareste, die zwischen den einzelnen Schollen zurückgeblieben seien, bedingt wären. Dann müßte aber die Temperaturzunahme in der Nähe der Vulkane eine schnellere sein, was den Tatsachen nicht entspricht. Ebenso unhaltbar ist nach Langs Ansicht die Behauptung, die Erde sei zwar einst im Innern fest gewesen, nachträglich aber durch Druck wieder flüssig geworden, „wenn man erwägt, daß die Erdmasse sich nicht verändert und vergrößert hat (abgesehen von den verhältnismäßig geringen Meteorzuführungen) und sich demnach der Druck auf die zentralen Erdteilchen gar nicht vermehrt haben kann; es hätte sich nach dieser Hypothese gar nicht der Erdkern ‚fest' bilden

Digitized by Google

können, wenn der in Wärme umgesetzte Druck der Urheber des flüssigen Erdinnern sein soll". Will man an der Annahme festhalten, daß das spezifische Gewicht der Silikate beim Festwerden größer werde, und daß trotzdem das Erdinnere flüssig sei, so wäre dies vielleicht noch dadurch möglich, daß die sich bildende Schlackenkruste sich selbst trüge, wie ein Gewölbe. Es müßte dann nach Lang bei fortschreitender Abkühlung das flüssige Erdinnere immer weiter zurückweichen und sich eine Schlackenschicht nach der andern bilden, sodaß die feste Erdkruste aus konzentrischen Schlackenkrusten bestände, was den Beobachtungen widerspricht. Ebenso unhaltbar ist die Ansicht, daß die Kompressibilität des Magmas mit abnehmender Temperatur in gleichem Maße abnimmt wie das spezifische Gewicht zunimmt, und daß sich auf diese Weise die spezifisch schwerere Kruste auf dem leichteren Magma halten könne.

„Nach dem Vorstehenden genügt also zu der Erklärung der Tatsache, daß sich die erstarrten Teile des Erdmagmas nicht um das Zentrum, sondern als Kruste an der Peripherie gruppiert haben, keine der angeführten Hypothesen, und bleibt dann nur die Annahme übrig, daß die fest gewordenen, kristallinisch kompakt erstarrten Teile des Erdmagmas ebenso wie die schlackig erstarrten Teile durch die Schwerkraft ihre Stelle an der Peripherie angewiesen erhalten haben, daß sie also, obwohl kompakt erstarrt, spezifisch leichter als das flüssige Magma gewesen sind. Mithin ist auch das für Eis und Eisen erkannte Gesetz in geologischen Betrachtungen als für den flüssigen Erdball im allgemeinen und großen Ganzen gültig anzusehen: Mit der Erstarrung des Magmas tritt zugleich eine bedeutende Ausdehnung (Volumenvergrößerung) ein, das spezifische Gewicht tritt in einen Minimalpunkt und das Gestein ist daher nach der Erstarrung leichter als sein Magma." Für diese Behauptung soll auch das hohe spezifische Gewicht der zentralen Erdpartien sprechen. Die zuerst gebildete Kruste sei von schlackiger Beschaffenheit gewesen; darunter folgten blasenreiche und schließlich kristallinisch erstarrte Gesteinsschichten, und zwar seien die beiden letzteren nur eine Folge des Druckes, der infolge der Volumenvermehrung beim Erstarren des Magmas aufträte, ebenso wie die besonders häufig an Basalt beobachtete säulige Absonderung. (Heute erklärt man die Säulenbildung als Kontraktionserscheinung.) Da der Wärmeverlust der Erde noch fortdauere, so verdicke sich die Kruste auch immer mehr. Gleichzeitig aber vermehre sich infolge der dabei auftretenden Volumenausdehnung der Druck im Innern und suche sich von Zeit zu Zeit durch vulkanische Eruptionen oder, wo er zum Durchbrechen der

Digitized by Google

Rinde nicht stark genug ist, durch Hebungen des Geländes auszugleichen. Den Schluß seiner Arbeit widmet Lang der Frage, welches nun eigentlich das älteste unter der Schlackenkruste erstarrte Gestein sei und kommt zu dem Resultat, daß dies kein anderes als der Gneiß sein könne. Auf diese Ausführungen möchte ich zunächst erwidern, daß die erste Erstarrungskruste aller Wahrscheinlichkeit nach nicht schlackig war, sondern aus einem vielleicht einem Gneiße ähnlichen Aggregat von Kristallen bestand, da die Abkühlung infolge der darüber lagernden heißen Atmosphäre, der starken Erwärmung von unten und bei dem viel höheren Druck nur langsam vor sich gehen konnte. Die Richtigkeit der ganzen übrigen Hypothese ist einzig und allein davon abhängig, ob sich die Silikate beim Kristallisieren ausdehnen oder zusammenziehen. Das eine ist jedenfalls sicher, daß der von Lang eingeschlagene Weg nicht der geeignete ist, um diese Frage zu entscheiden, sondern daß diese Art der Naturforschung geradezu schädlich für die Wissenschaft ist. Alle Schlüsse und Hypothesen müssen sich doch auf Tatsachen und Experimente stützen, und man darf nicht wie Lang, weil er die Erdkrustenbildung für den Fall, daß sich die Silikate beim Erstarren zusammenziehen, nicht erklären kann, den experimentellen Beobachtungen zum Trotz das Gegenteil annehmen.

Verhalten der verschiedenen Substanzen beim Übergang vom isotropen in den anisotropen Zustand.

Inzwischen sind über das Verhalten der einzelnen Stoffe beim Übergang von einem Zustand in einen anderen eine Reihe von Arbeiten erschienen, denen wir uns jetzt in einer Zwischenbetrachtung zuwenden wollen.

Zirkel[134]) schließt aus Schmelzversuchen an Granat, Vesuvian, Augit, Olivin und verschiedenen Feldspäten auf eine Verminderung des spezifischen Gewichts beim Übergang aus dem kristallisierten in den glasigen Zustand. Lang[135]) glaubt auf Grund der von Jahr bei der Kristallisation des Eisens beobachteten Volumvermehrung auf eine gleiche Erscheinung bei den Magmen schließen zu dürfen. Gleichfalls Ausdehnung im Momente des Festwerdens beobachtete Millar[136]) bei Gußeisen und Whitley[137]) bei Gußeisen, Messing, Schlacke und Basalt. Die Arbeit Millars ist besonders deshalb bemerkenswert, weil er ausdrücklich hervorhebt, daß das feste und flüssige Material möglichst dieselbe Temperatur haben müssen, und daß man nicht etwa, wie vor ihm oft geschehen, festes kaltes mit flüssigem Material vergleichen dürfe. Sonderbarerweise kommt

Digitized by Google

Millar[136c]) in einer zweiten, mir leider nur in einem Referat[77]) XI, 1887, S. 220 zugänglichen Arbeit zu gerade entgegengesetzten Resultaten, indem er fand, daß alle von ihm untersuchten Metalle im Moment der Kristallisation keine Volumenzunahme erleiden, wenn sie frei von Luft oder Gas sind.

Werner Siemens[188]) ließ durch seinen Bruder Friedrich Siemens Versuche an Glasflüssen anstellen. Dabei ergab sich, daß sich dünnflüssiges Glas bei der Abkühlung stark zusammenzieht und zähflüssig wird; bei weiterer Temperaturabnahme ist die Zusammenziehung eine nur geringe, und im Momente der Erstarrung findet eine geringe Ausdehnung statt. Infolgedessen kann Druck nur den Übergang vom dünn- zum zähflüssigen Zustand begünstigen und nicht vom zähflüssigen zum isotrop festen. Siemens schließt daraus im Gegensatz zu Thomson, daß das Erdinnere nicht fest, sondern zähflüssig oder plastisch sei; auch die von Thomson für die Erde geforderte Starrheit stehe dieser Annahme nicht entgegen, da zähe Massen jede Gleichgewichtsstörung nur sehr langsam fortpflanzten, und daher die inneren Ebbe- und Fluterscheinungen die äußeren nur wenig veränderten. Alle bisherigen Untersuchungen leiden an dem Übelstande, daß die einzelnen Forscher immer nur ein oder sehr wenig verschiedene Materialien untersuchten und zum Teil mit sehr wenig einwandfreien Methoden. Es war daher ein großer Fortschritt, als Nies und Winkelmann[189]) alle wichtigen Metalle einer eingehenden Untersuchung unterwarfen. Es ergab sich dabei, daß Zinn, Zink, Wismut, Antimon, Eisen und Kupfer im Momente der Kristallisation eine deutliche Volumenvermehrung erfahren; für Blei und Cadmium war eine sichere Entscheidung nicht zu treffen; aller Wahrscheinlichkeit nach zeigen sie ein gleiches Verhalten. Die von den heutigen — abgesehen vom Verhalten des Wismut — abweichenden Resultate dürften wohl darin ihre Erklärung finden, daß diese Metalle bei den von den beiden Forschern angewandten Temperaturen Zustandsveränderungen erlitten haben, von deren Existenz man damals noch nichts wußte. Später wurde noch Gold und Silber untersucht[140]) S. 32, ohne jedoch ein abschließendes Resultat über das Verhalten dieser beiden Stoffe zu erlangen. Den an Legierungen angestellten Versuchen messen die genannten Forscher nur geringe Bedeutung zu, da es bei ihnen außer anderen eigentümlichen Erscheinungen, die störend auf die Untersuchung einwirken, sehr schwer ist, eine homogene Masse zu erhalten. Auf Silikate konnten die Untersuchungen leider nicht ausgedehnt werden, da die zu ihrer Verflüssigung nötige Temperatur nicht zu Gebote stand.

Digitized by Google

Nies [140]) hat acht Jahre später wahrscheinlich zu machen gesucht, daß sich die Silikate gleichfalls im Momente der Erstarrung ausdehnen. Er weist zunächst darauf hin, daß feste Gesteinsstücke nicht nur auf den Laven schwimmen, sondern daß sie auch nach Palmieris Versuchen am Vesuv nach dem Untertauchen wieder in die Höhe kommen. Auch die im Lavasee des Kilaueakraters schwimmende Insel spreche für Ausdehnung im Momente des Festwerdens, da sich allenfalls eine dünne Platte schwereren Materials schwimmend erhalten könne, nicht aber ein Block von solchen Dimensionen (18 m tief, 30 m lang). Die schon angeführten experimentellen Beobachtungen sind noch nicht imstande, die Frage über das Verhalten der Silikate beim Kristallisieren endgültig zu lösen, da die Resultate zu widersprechend sind; wohl aber sollen nach Nies die an den Eruptivgesteinen, besonders am Basalt beobachteten Absonderungsformen für eine Volumenvermehrung beim Erstarren sprechen, während man heute gerade das Gegenteil annimmt. Vincenti und Omodei [141]) (nach [77]) XIII 1889, XV 1891) untersuchten das spezifische Gewicht von Cadmium, Blei, Wismut, Zinn, Natrium, Kalium, Phosphor und Quecksilber nahe am Schmelzpunkt in festem und flüssigem Zustande und fanden, daß nur Wismut eine Ausnahmestellung einnimmt, indem es sich beim Kristallisieren ausdehnt, während alle übrigen der genannten Stoffe sich zusammenziehen. Aus einer Zusammenstellung der wichtigsten bis 1884 erschienenen Arbeiten über das Verhalten der einzelnen Stoffe beim Erstarren zieht Wadsworth [142]) den Schluß, daß sich die meisten Metalle und Silikate ausdehnen. In dieser Abhandlung, in der er die Flüssigkeit des Erdinnern zu erweisen sucht, geht er von den von anderen Forschern für ein festes Innere ins Feld geführten Tatsachen aus, wie z. B. Präzession, Nutation, Gezeiten und Verhalten der verschiedenen Substanzen gegen Druck und Hitze. Er sucht deren Unrichtigkeit zu beweisen und glaubt sich infolgedessen zu dem Schluß berechtigt, die Geologie könne jede beliebige, mit den geologischen Tatsachen in Einklang zu bringende Hypothese über das Erdinnere machen, ohne sich um die mathematischen und physikalischen Beweise für die Festigkeit der Erde zu kümmern. — Die wichtigste Untersuchung über das Verhalten der Silikate hat, wie schon erwähnt, Barus [143]) am Diabas angestellt. Er untersuchte die Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom Druck und fand, daß sich die Silikate bei der Kristallisation zusammenziehen; der Schmelzpunkt wird also durch Druck erhöht. Findet daher eine Kristallisation bei hohem Druck statt, so werden die schon festen, kristallisierten Massen nach Aufhebung des Druckes wieder flüssig. Zu dem gleichen Re-

Digitized by Google

sultate bezüglich der Silikate kommt Doelter[144a]). Er führt zunächst aus, daß weder das Schwimmen der festen Lava auf flüssiger, noch das Wiederauftauchen von untergetauchten Lavastücken ein Beweis für die Ausdehnung im Momente der Erstarrung sei, da beide Vorgänge lediglich durch die poröse Beschaffenheit der festen Laven bedingt seien. Als weitere Fehlerquellen bei den Schwimmversuchen ergeben sich die verschiedene Temperatur des festen und flüssigen Materials, Gasentwicklungen und aufsteigende Strömungen in der Flüssigkeit. Um diese Fehler zu vermeiden, benutzte Doelter zur Bestimmung des spezifischen Gewichts der Flüssigkeit Indikatoren, deren Schmelzpunkt höher war als der des geschmolzenen Silikates, so daß sie, ohne geschmolzen zu werden, auf die Schmelztemperatur des zu untersuchenden Silikates erhitzt werden konnten. Am geeignetsten zu diesem Zwecke waren kleine Bruchstücke von Quarz, Orthoklas, Olivin, Diopsid, Disthen, Topas und Titanit. Es wurde Melanit, Augit, Spodumen, Limburgit, Lava vom Vesuv und Ätna, Nephelinit und Leucitit untersucht und zwar im flüssigen, rasch erstarrten glasigen und langsam kristallin erstarrten Zustande. Dabei ergab sich, daß die flüssigen Massen das geringste spezifische Gewicht haben und die kristallin erstarrten das höchste. Daß auch diese Versuche nicht ganz fehlerfrei sind, gibt Doelter[144b]) S. 151, 152 selbst zu: „Da das spezifische Gewicht der Schwimmkörper nicht bei 1100°, sondern bei 20° bestimmt ist, ergeben sich Unterschiede von 0—2%, diesen stehen aber die im entgegengesetzten Sinne laufenden Fehler gegenüber, welche daraus resultieren, daß die Gase die Schwimmkörper in die Höhe treiben und daß infolge der vielleicht teilweise durch mangelnde Benetzung herbeigeführten Bildung einer hohlen Kugelschale sogar ein etwas schwererer Körper in der Flüssigkeit schwimmt. Aus den sich aufhebenden Fehlern resultieren daher Werte, die von den gefundenen nicht viel abweichen werden, daher sich ein merkbarer Unterschied zwischen dem Volumen des Kristalls und dem Volumen der dünnflüssigen Schmelze ergibt." Ein weiterer, von Doelter nicht berücksichtigter Fehler kann dadurch entstehen, daß die als Indikatoren benutzten Mineralien bei den hohen Temperaturen Zustandsänderungen, mit denen eine Änderung des spezifischen Gewichts verbunden ist, erleiden können. Auch Tammann[145]) S. 24, 26, 42 spricht sich verschiedentlich für eine Volumenkontraktion beim Kristallisieren aus und zwar nicht nur für die Silikate, sondern für alle Stoffe mit Ausnahme von Wismut und Wasser. Trotz alledem gibt es heute immer noch Leute, die an eine Ausdehnung der Silikate bei der Kristallisation glauben und darauf große

Digitized by Google

Hypothesen aufbauen, wie z. B. Stübel[146]), der die vulkanischen Erscheinungen dadurch erklären will. Die Unrichtigkeit seiner Voraussetzungen erübrigt es, näher auf seine Ausführungen einzugehen.

Von besonderer Wichtigkeit ist die Tatsache, daß sich die Schmelzpunktserhöhung mit zunehmendem Druck bald verringert, und daß sie ein Maximum erreicht, den maximalen Schmelzpunkt, um bei weiterer Drucksteigerung wieder abzunehmen. Tammann[145]) bestimmte den maximalen Schmelzpunkt für einige Substanzen; leider ist er bis jetzt weder für die Silikate, noch sonst einen bei der Zusammensetzung unserer Erde hervorragend beteiligten Stoff experimentell bestimmt. „Für das Magma (bei dem auch noch das Wasser in Betracht kam) haben wir keine Daten, und wir wissen nicht, ob der maximale Schmelzpunkt bei 40 000 Atmosphären oder erst bei 100 000 liegt, demnach könnte auch das Maximum des Schmelzpunktes schon bei 200° über jenem bei 1 Atmosphäre liegen, vielleicht aber erst bei 500° und darüber. Bezüglich der Tiefe, bei welcher der maximale Schmelzpunkt erreicht wird, so kann sie zwischen 150—300 km schwanken, es dürfte aber erstere Zahl eher der Wahrheit nahe kommen. Demnach kann die Erdrinde bis 100 km fest sein, aber bei 300 km höchstens muß Schmelzung eintreten." — „Wir wissen jetzt, daß es einen maximalen Schmelzpunkt gibt, und daß daher bei einer näher noch nicht bekannten Tiefe das Erdinnere flüssig sein muß, und wir wissen bezüglich des Zustandes dieses flüssigen Magmas, daß dasselbe ungemein zähe ist und sich daher in vielen Punkten von den festen Körpern wenig unterscheidet" [144c]) S. 3.

Einen weiteren Beitrag zur Bereicherung unserer Kenntnisse über das Verhalten der Stoffe im Erdinnern hat uns Tammann[147]) in einer Abhandlung über das Verhalten des Eisens unter Druck gegeben. Man kennt beim Eisen drei Modifikationen, α-, β- und γ-Eisen. Das erstere ist bis 770° beständig, wo es sich ohne erhebliche Volumenänderung unter bedeutender Wärmeabsorption in β-Eisen umwandelt und die Magnetisierungsfähigkeit fast vollständig verliert. Das β-Eisen geht bei 890° unter nochmaliger Wärmeabsorption und bedeutender Volumenkontraktion in das bis zum Schmelzpunkt beständige γ-Eisen über. Durch Druck und Zusätze von Kohlenstoff oder Nickel wird die Umwandlungstemperatur erniedrigt. „Infolgedessen wird das Eisen in der Erde schon in nicht erheblicher Tiefe sich im γ-Zustande befinden. Das in Tiefen über $^1/_{100}$ Erdradius (bei über 16 000 kg Druck und über 600°) in der Erde vorkommende Eisen, welches wohl nickel- und kohlenstoffhaltig ist, könnte sich nur

Digitized by Google

im γ-Zustande, in dem es nur schwach magnetisierbar ist, befinden. Bei sinkender Temperatur der Erde würde dann das Eisen unter Volumenvergrößerung in den stärker magnetisierbaren Zustand übergehen." Den Abschluß dieser Erörterungen über das Verhalten bei der Kristallisation möge eine Betrachtung von Tammann[145]) S. 181—184, „Über die Änderung des Aggregatzustandes bei der Abkühlung eines chemisch homogenen Weltkörpers", bilden. Wenn auch die Erde keine chemisch homogene Kugel war, und sich die Verhältnisse infolgedessen viel komplizierter gestaltet haben werden, so sind diese Ausführungen doch nicht ohne Interesse, da sie der erste derartige Erklärungsversuch sind, der sich der neuesten Errungenschaften dieses Teils der Wissenschaft bedient. Der Verfasser unterscheidet zwei Fälle: entweder es treten bei der Abkühlung Konvektionsströme auf, oder die konzentrischen Schichten bleiben in Ruhe, da die Temperatur- und Druckzunahme nach innen so ist, daß die Dichte fortwährend zunimmt. Im ersten Falle bildet sich in der dem maximalen Schmelzpunkt entsprechenden Tiefe ohne Volumenänderung eine kristallisierte Kugelschale, von der aus die Kristallisation nach außen schneller unter Volumenkontraktion und nach innen langsam unter Volumendilatation vor sich geht. Der durch die Dilatation entstandene Überdruck sprengt von Zeit zu Zeit die Kruste und preßt flüssige Massen heraus, wobei mondkraterähnliche Gebilde entstehen, wenn die Verfestigung der Kruste schon bis zur Oberfläche fortgeschritten ist, und die Flüssigkeit die Oberfläche erreicht. Die Kristallisation im Innern geht bis zu der Tiefe, wo $\frac{dT}{dp} =$ unendlich wird; jenseits dieser Schicht erstarrt der Rest bei weiterer Abkühlung amorph. (Da einer unendlich kleinen Druckzunahme eine unendlich große Temperaturzunahme entspricht.) Wenn keine Konvektionsströme auftreten, so kann mit wachsender Tiefe die Temperatur mit steigendem Druck langsamer zunehmen als auf der Schmelzkurve, und dann beginnt die Kristallisation im Innern; zunächst sinkt das Kristallisierte etwas unter die Tiefe, wo der Druck des maximalen Schmelzpunktes herrscht, und dann ist der Vorgang derselbe wie im ersten Falle, wo Konvektionsströme auftreten. Nimmt die Temperatur schneller zu, so beginnt die Kristallisation an der Oberfläche.. Die Schollen sinken unter, schmelzen dabei wieder und rühren durch ihre Bewegung die oberste Schicht durcheinander, so daß ihre Temperatur konstant bleibt, bis die fortschreitende Kristallisation die Bewegung hindert, wobei die ausgestrahlte Wärmemenge plötzlich stark sinken wird. „Hat die Kristallisation der Kugel ihr

Digitized by Google

Ende erreicht, so sind damit die Änderungen des Aggregatzustandes der Kugel noch nicht abgeschlossen, da viele Stoffe bei der Abkühlung noch weiteren Umwandlungen in polymorphe Kristallarten unterliegen." Je nachdem bei diesen Umwandlungen mehr oder weniger Kristallisationszentren auftreten, ehe eine größere Unterkühlung erreicht ist, werden sie sich in säkularen Änderungen des Erdniveaus oder in Erdbebenstößen äußern.

Zu diesen Untersuchungen möchte ich bemerken, daß ihre Resultate deshalb so wenig übereinstimmend sind, besonders in früherer Zeit, weil nicht genügend Wert auf eine genaue Definition des Begriffs „Zustand" gelegt worden ist, und weil man glaubte, es käme nur darauf an, ob die betr. Substanz fest oder flüssig sei. Später identifizierte man fest mit kristallisiert und flüssig mit amorph. Neuere Untersuchungen, besonders von O. Lehmann[176]), haben aber ergeben, daß auch im kristallisierten Zustande alle Grade der Festigkeit vorkommen, ja es gibt sogar kristallinische Substanzen, die flüssiger sind als Wasser. Aus diesem Grunde ist von Tammann[145]) S. 5 folgende neue Einteilung der Zustände vorgeschlagen, die im Gegensatz zu der alten Einteilung mehr Gewicht auf die Abhängigkeit der Eigenschaften von der Richtung legt.

I. Isotroper Zustand:	II. Anisotroper Zustand:
1. Gasförmig.	Kristallzustand:
2. Flüssig.	verschiedene polymorphe
3. Amorph.	Kristallarten.

Es kommt für uns in erster Linie darauf an, wie sich die das Erdinnere zusammensetzenden Substanzen gegen hohe Temperaturen und Drucke verhalten, ob sie nämlich in den isotropen oder anisotropen Zustand übergehen. Leider müssen wir zugeben, daß gerade in diesem Punkte fast gar nichts bekannt ist, da derartige Untersuchungen mit genügend hohen Drucken und Temperaturen bis jetzt noch nicht vorliegen. Wir sind einzig auf Analogieschlüsse angewiesen. Danach ist es sehr wahrscheinlich, daß der anisotrope Zustand das kleinere Volumen hat, also unter Druck beständiger ist, mit Ausnahme von Eis, Wismut, Arsentrioxyd und einigen Boraten [144b]) S. 8. Für eine Kristallisation unter Druck spricht auch die bei Laven gemachte Beobachtung, daß die im Innern unter Druck gebildeten Kristalle sich sofort wieder auflösen, wenn die Lava die Oberfläche erreicht, wenn also der Druck aufgehoben wird. Außerdem ist noch zu berücksichtigen, daß die Schmelzpunkte von anisotropen Körpern oft höher sind, als die derselben Substanz im isotropen Zustand, z. B. Orthoklas (1215 resp. 1190°) und Olivin (1280° resp.

Digitized by Google

1255[9]) [144b]) S. 9. Dies geht auch daraus hervor, daß Schmelzen nur dann kristallisieren, wenn man sie einige Zeit auf einer über dem Schmelzpunkt liegenden Temperatur erhält. Es spricht also vieles für die Annahme, daß die das Erdinnere zusammensetzenden Stoffe sich im anisotropen Zustand befinden, wenigstens bis zu den Tiefen, wo der maximale Schmelzpunkt nicht überschritten ist. Daß das Erdinnere aber trotzdem bis zu einem gewissen Grade plastisch ist, unterliegt keinem Zweifel, wie die bereits erwähnten Beobachtungen der kosmischen Physik und Seismik gelehrt haben. Es steht dies auch durchaus nicht im Widerspruch mit der Annahme, daß die Substanzen sich im anisotropen Zustand befänden, da wir schon bei gewöhnlicher Temperatur und Atmosphärendruck anisotrope Körper im plastischen Zustand kennen, z. B. Silberglanz. Tammanns Untersuchungen über das Verhalten eines Weltkörpers bei der Abkühlung lassen sich nicht ohne weiteres auf die Erde anwenden. Man muß bei einer solchen Betrachtung zwischen der äußeren, wesentlich aus Silikaten bestehenden Kruste und dem inneren Metallkern trennen. Ferner ist auch nicht berücksichtigt, daß Legierungen oft ein ganz anderes Verhalten zeigen als die reinen Metalle. Daher lassen sich auch die am Eisen beobachteten Eigenschaften nicht ohne weiteres auf den Erdkern übertragen, da dieser nach Analogie der Meteoriten aus Nickeleisen mit noch anderen Beimengungen besteht. Was schließlich das Verhalten des Eisens selbst betrifft, so scheint mir folgender Umstand nicht genügend berücksichtigt zu sein: Wenn eine Eisenschmelze erstarrt, so wird beim Übergang vom isotropflüssigen zum anisotropen Zustand Wärme frei, und die eben erst gebildeten Kristalle dehnen sich infolge der Temperatursteigerung wieder aus. Nun darf man aber das Volumen dieser anisotropen Phase nicht etwa mit dem der isotropen Phase, aus der sich die Kristalle bildeten, vergleichen; sondern man muß es mit dem Volumen der Schmelze vergleichen, die man erhielte, wenn man die anisotrope Phase bis zu ihrem Schmelzpunkt erhitzen würde. Dann würde sich wahrscheinlich ergeben, daß sich auch das Eisen, wie fast alle übrigen Stoffe, bei der Kristallisation zusammenzieht.

Nach dieser kleinen Abschweifung kehren wir wieder zu den Arbeiten zurück, die für ein flüssiges Erdinnere eintreten. Airy[148]) sucht die Flüssigkeit des Erdinnern aus der Kant-Laplaceschen

Digitized by Google

Theorie abzuleiten, indem er von der Annahme ausgeht, daß die Erde und die übrigen Planeten durch Verdichtung von Gasmassen entstanden seien, und daß dabei das Innere so sehr erhitzt sei, daß es sich nur im flüssigen Zustand befinden könne. Gegen Thomsons und Darwins Beweis von der Starrheit der Erde führt Hennessy[149a]) an, daß diese beiden Forscher über die Beschaffenheit der Erde so weit von der Wahrheit abweichende Voraussetzungen machen (inkompressible, homogene Flüssigkeit), daß sich die Gezeiten in Wirklichkeit ganz anders gestalten könnten, und daß also auf diese Weise die Unmöglichkeit eines flüssigen Erdkerns nicht erwiesen sei. Auf Grund einer theoretischen Untersuchung kommt Hennessy[149b]) zu dem Schluß, daß die Erde aus einer festen Kruste von Schichten besteht, deren Dichte und Abplattung nach innen zunimmt bis zum flüssigen Kern, in dem dann wieder eine Abnahme der Abplattung nach dem Zentrum zu stattfindet. Daher würde die Kruste am Äquator am dünnsten, an den Polen am dicksten sein, und auf diese Weise sollte sich auch das Vorherrschen der Vulkane nach der äquatorialen Zone zu erklären. Außer einer Arbeit von Woodward[150]), die nichts wesentlich Neues bringt, ist eine ganz eigenartige, aber ganz unhaltbare Ansicht von Löffelholz[151]) zu erwähnen, der annimmt, daß sich die feste Kruste über dem flüssigen Kern dreht und zwar in den verschiedenen geologischen Epochen in verschiedener Richtung. Dieses Gleiten der Kruste über dem flüssigen Kern soll dadurch zustande kommen, daß die nicht überall gleich schwere Kruste mit ihren schwereren Teilen in die Rotationsebene der Erde und die Ebene der Sonnenanziehungskraft zu gelangen sucht. Auf diese Weise können die einzelnen Länder bald in polare, bald in äquatoriale Regionen kommen, und so sollten sich die Eiszeiten und das tropische Klima früherer geologischer Epochen in Europa erklären lassen. Für ein derartiges Herumirren der Erdpole haben wir gar keinen Beweis, und ferner brauchen wir sie für die Erklärung der wärmeren Klimate vergangener Zeiten nicht, während dagegen die Erklärung der Eiszeiten an den Interglacialzeiten scheitert. Auch Toula[58]) S. 48 spricht sich, wenn auch mit Vorsicht, für ein flüssiges Erdinnere aus: „Damit kämen wir wieder auf die Zulässigkeit der Annahme, daß das Innere der Erde in einem glutflüssigen Zustande sich befinde und in allmähliger Abkühlung und Zusammenziehung begriffen sei. Das wäre wesentlich einfacher als etwa die Annahme, das Innere sei ein Gasball viel starrer als Stahl — ein Zustand, der eigentlich nur als ein gasunähnlicher bezeichnet werden könnte und nicht als ein gasähnlicher."

Digitized by Google

c) Fester Zustand.

Wir kommen jetzt zum letzten Abschnitt, der sich mit den Arbeiten der Forscher beschäftigen soll, die für ein festes Innere eintreten. Auch hierbei gehen die Ansichten noch weit auseinander. Während die einen die ganze Erde als fest annehmen, nehmen andere zwischen der festen Kruste und dem festen Kern eine flüssige Zwischenschicht an. Auch über die Art der Festigkeit sind die Meinungen geteilt, indem man teils das fest als gleichbedeutend mit erstarrt auffaßt, andernteils die Festigkeit als eine nur bedingte ansieht, die bei Druckentlastung sofort wieder aufhört. Shaler[152]) schließt seine Betrachtungen über das Erdinnere mit dem Satze: „The most probable hypothesis in the present state of our knowledge of the earth is, that it consists of an immense solid nucleus, a hardened outer crust, and an intermediate region of comparatively slight depth, in an imperfect state of igneous fusion."

Pfaff[111]) S. 42, 43 hält es für unnötig, das hohe spezifische Gewicht des Erdinnern durch die Annahme, daß sich dort spezifisch schwerere Materialien befänden, zu erklären. Er ist der bereits als irrig zurückgewiesenen Ansicht, daß einfach der Druck der darüber lastenden Massen genüge, um die an der Oberfläche vorhandenen Stoffe auf ein Drittel ihres Volumens zusammenzupressen. Da nun Gase durch Druck verflüssigt, Kohlensäure selbst fest würde, so sei es sehr wahrscheinlich, daß auch das Magma durch den gewaltigen Druck nicht im flüssigen Zustand bleiben könne, sondern daß die Erde aus einem durch Druck verfestigten Kern, einer flüssigen Zwischenschicht und einer festen Kruste bestehe. Den gleichen Standpunkt, daß die Starrheit des Erdinnern eine nur bedingte sei, und daß das Magma bei Druckentlastung wieder flüssig werde, vertritt Reyer[153]). Im Gegensatz dazu glaubt Roche[154]), daß sich der durch die neueren Messungen für die Erdabplattung ergebende Wert mit einer im Innern flüssigen Erde nicht vereinigen lasse, sondern daß schon in Zeiten, wo die Winkelgeschwindigkeit der Erde eine viel geringere war, ein beträchtlicher Teil des Innern erstarrt sei, so daß sich heute nur noch unter der dünnen äußeren Kruste eine flüssige Zwischenschicht befinde. Barnard[155]) untersuchte die Flutphänomene für eine mit der Erde gleich große Stahlkugel und kommt wie Darwin und Thomson zu dem Resultat, daß die Starrheit der Erde größer als die des Stahles und Glases sein müsse. Außer den genannten Arbeiten sind eine Reihe von Abhandlungen von O. Fisher erschienen, deren bedeutendste „Physics of the Earth's Crust"[156]) ist. Sie ist deutsch von A. Fischer[157]) bearbeitet worden,

Digitized by Google

und an diese Bearbeitung werde ich mich bei der Inhaltsangabe im wesentlichen halten. Ausgehend von den wenigen Resultaten, die sich aus den Tiefentemperaturen, den Gezeiten und astronomischen Beobachtungen ergeben, nimmt er eine Erdkruste von 40 km Dicke an, unter der sich geschmolzene, an Dichte nach dem Zentrum zunehmende Massen befinden. Infolge des hohen Druckes im Innern wird der Kern verfestigt, und die Erde erscheint im großen und ganzen in ihrem Verhalten äußeren Einflüssen gegenüber als ziemlich unnachgiebig. Die flüssige Schicht unter der festen Kruste hält Fisher für nötig, um die Entstehung der Gebirge erklären zu können, weil bei der Abkühlung einer festen Erdkugel immer zwei zu einander senkrechte Gebirgsketten entstehen müßten da sich der Druck in zwei zu einander rechtwinklige Komponenten zerlegte. Gleichzeitig erklärte diese flüssige Masse die Oszillationen des Landes und würde das Material für die Vulkane liefern. Wäre diese Flüssigkeitsschicht wenigstens 60 Meilen dick, und ruhte sie auf einem starren Kern, so würde infolge der inneren Reibung die Periode der halbtägigen Ozeangezeiten nicht erheblich geändert, während die vierzehntägigen auf $^7/_{10}$ des theoretischen Wertes verringert würden[158a]). Die Gezeiten des Magmas würden durch die in ihm absorbierten Gase wesentlich verringert werden, da die Gase bei Druckerleichterung (Ebbe) in großer Menge frei würden und durch ihren Druck das Nachsinken der Erdkruste verhinderten, während sie bei Druckvermehrung (Flut) wieder absorbiert würden, sodaß die Erdkruste fast vollständig in Ruhe bleibt[158b]). Auf diesem flüssigen Magma schwimmt die Kruste wie Eis auf Wasser und taucht bald mehr, bald weniger ein, je nach der Belastung von oben. Die durch Seitendruck entstandenen Gebirge tauchen ungefähr neunmal so tief in das Magma ein, als sie sich über der Oberfläche erheben. Da dieser eingetauchte Teil, die „Wurzel" der Gebirge, ein geringeres spezifisches Gewicht als das flüssige Magma haben muß, so findet man bei den Gebirgen mit Wurzel die Lotablenkung geringer, als man sie berechnet hat; auch daß die Lotlänge auf dem Festlande kleiner ist als auf dem Meere, hält Fisher für einen Beweis seiner Wurzeltheorie. Unter Zuhilfenahme dieser Annahme über die Beschaffenheit der Erde sucht er[158c]) die durch Pendelmessungen in Indien festgestellten Anomalien in der Schwereverteilung zu erklären. —

Schiaparelli[129]) hat, wie schon erwähnt, die Bewegungen der Rotationsachse theoretisch für eine absolut starre Erde, für eine Erde mit leicht verschiebbaren Teilchen, die sich der neuen Gleich-

Digitized by Google

gewichtslage leicht anpassen und endlich für den Fall, wo die Anpassung erst dann erreicht wird, wenn die Spannungen eine gewisse Größe überschreiten, untersucht. Er kommt dabei zu dem bemerkenswerten Resultat, daß die Bewegungen der Pole möglich sind, und daß nur eine absolut starre Erde frei davon ist, während sonst selbst geringe geologische Veränderungen, wenn sie nur lange genug wirken, eine Verlegung der Pole in großem Maßstabe bedingen. Aus der geringen Abweichung der theoretisch berechneten Polhöhenschwankungen von den beobachteten schließt Newcomb[159]), daß die Erde nur ein elastischer, ziemlich starrer Körper sein könne, mindestens so starr als Stahl, ja Rudzki[160]) kommt auf Grund gleicher Untersuchungen sogar zu dem Resultat, daß die Starrheit fast zweimal so groß sein müsse, als die des Stahls. Außer der schon eingehend besprochenen Arbeit von Wiechert[95]) sind noch die von Rinne[161]) und Becker[162]) zu nennen, die gleichfalls für ein festes Erdinnere eintreten. Eine Zusammenstellung der wichtigsten Tatsachen, die einen Schluß auf die Beschaffenheit des Erdinnern erlauben, gibt Láska[163]). Ausgehend von der Wärmezunahme nach der Tiefe schließt er auf eine plastisch-glühende Schicht in 50—70 km Tiefe. Diese plastische Schicht gäbe eine ebenso einfache Erklärung für die säkularen Hebungen und Senkungen, wie für die durch wechselnden Luftdruck verursachte mikroseismische Pendelunruhe. Weit schwieriger ist es zu sagen, was sich unterhalb jener plastischen Zone vorfindet. Nach des Verfassers Meinung genügen weder die thermischen Beobachtungen, um ein flüssiges Innere zu rechtfertigen, noch diejenigen über Dichte, Form oder Bewegung der Erde, um uns Aufschluß über den Zustand des Innern zu geben. Er geht hierauf zu den von Hopkins, Darwin, Thomson und Wiechert für ein festes Erdinnere angeführten Beweise über und sucht eine Erklärung für die Entstehung einer festen Erdkugel, wie sie Wiecherts Auseinandersetzungen erfordern. Er denkt sich aus den Urnebeln zuerst Meteoriten entstanden und aus diesen erst durch Anhäufung die Weltkörper und Monde gebildet. Der beste Beweis für diese Annahme sei ein Vergleich der spezifischen Gewichte der Weltkörper unseres Sonnensystems. „Die geringste Dichte besitzt Saturn, er stellt demnach das in der Vollendung am meisten zurückgebliebene Glied unseres Sonnensystems dar. In seiner Umgebung haben wir also jene Elemente zu suchen, welche wohl bei der Bildung des ganzen Sonnensystems am frühesten auftraten. Nun ist, wie bekannt, Saturn von einem Ringe umgeben, der nachgewiesenermaßen aus Meteoriten oder ihnen ähnlichen Körpern besteht“ (vgl. auch [169])

Digitized by Google

S. 316—335). „Es scheint demnach, daß die Meteoriten jene Elemente waren, aus welchen — chemisch gesprochen — unser Sonnensystem sich gebildet hat. Für die Theorie des festen Erdinnern sprechen also Tatsachen, deren Aufdeckung erst in der neueren Zeit erfolgte. Diese sind als Folgerungen der neueren mathematischen Denkweise offenbar schwerwiegender, als die Ergebnisse philosophischer Spekulation vergangener Zeiten. Indessen darf nicht vergessen werden, daß sie nicht den Tag, sondern höchstens nur die Morgenröte der wahren Erkenntnis darstellen."

Einige in neuester Zeit erschienene Abhandlungen, wie: Bautz, Die Hölle; Elbe-Carnitz, Die natürlichen Ursachen des Vulkanismus und die Zukunft der Erde; Siepermann, Eine neue Theorie des flüssigen Zustandes und ihre Anwendung auf die Entstehungsgeschichte unseres Planetensystems; und einige andere mehr will ich lieber nicht in den Rahmen dieser Betrachtung ziehen, da sie allzu phantasiereich und ohne wissenschaftliche Grundlage sind, so daß sie vielleicht fürs Mittelalter ganz gut hätten sein mögen, aber nicht für das 20. Jahrhundert.

7. Schlußfolgerungen.

Es bleibt noch übrig zu untersuchen, welcher der erörterten Hypothesen — festes oder flüssiges Erdinnere — der Vorzug zu geben ist, nachdem sich ein gasförmiger Kern bereits als unhaltbar ergeben hat. Das eine ist jedenfalls von vornherein klar, daß ein flüssiges Innere mit einer dünnen Kruste unvereinbar mit vielen astronomischen Beobachtungen und daher zu verwerfen ist. Alles deutet darauf hin, daß die Erde, wenn auch nicht ganz starr, so doch ziemlich fest und äußeren Einflüssen gegenüber unnachgiebig ist. Darüber ist man doch jetzt vollständig einig, und trotzdem streitet man noch immer, ob das Innere der Erde fest oder flüssig ist, anstatt zu fragen, ob sich das Erdinnere im anisotropen oder isotropen Zustand befindet; denn nur darauf kommt es noch an, da wir festgestellt haben, daß die Plastizität der Erdkugel bis zu einem gewissen Grade als sicher anzusehen ist. Leider sind wir, wie oben schon näher ausgeführt ist, heute noch nicht in der Lage auf Grund experimenteller Beobachtungen diese Frage endgültig zu entscheiden; dies ist uns erst möglich, wenn uns die Physiker das nötige Material über das Verhalten der Substanzen bei hohem Druck und hoher Temperatur liefern, und es wäre sehr erwünscht, wenn gerade in dieser Richtung in nächster Zeit Untersuchungen angestellt würden. Bis jetzt können wir nur aus dem Verhalten der Stoffe, soweit wir es heute kennen,

Digitized by Google

schließen, daß sich die im Erdinnern befindlichen Massen im anisotropen oder kristallisierten Zustand befinden, weil sie in diesem den kleinsten Raum einnehmen. Davon kann es nur für die zentralen Partien eine Ausnahme geben, wenn nämlich für sie der maximale Schmelzpunkt überschritten ist; dann würden sich allerdings diese Massen in einem isotrop flüssigen Zustand befinden, der jedoch mit fortschreitender Abkühlung in den anisotropen übergehen müßte, sowie nämlich der maximale Schmelzpunkt nicht mehr überschritten ist. Allein ich glaube auf Grund der wenigen Untersuchungen, die bis jetzt vorliegen, sind wir noch nicht berechtigt, in dieser Richtung irgend eine Anwendung auf das Verhalten der das Erdinnere zusammensetzenden Substanzen zu machen, solange uns nicht wenigstens Beobachtungen über irgend ein Metall oder Silikat vorliegen. Daher dürfte es jetzt am wahrscheinlichsten sein anzunehmen, das Erdinnere befinde sich im plastischen anisotropen Zustand, der allerdings bei Aufhebung des Druckes in den isotrop flüssigen, ja vielleicht sogar in den gasförmigen übergehen würde.

8. Zusammenfassung der wichtigsten Resultate.

Halten wir auf das Gesagte noch kurz einen Rückblick. Wir gingen von der stofflichen Zusammensetzung der Erde aus. Die äußere, der direkten Beobachtung zugängliche Kruste hat ungefähr die Zusammensetzung eines Diorits. Darunter müssen sich erheblich dichtere Massen befinden, da die mittlere Erddichte zwischen 5,4 und 5,7 liegt, und die Kruste etwa eine Dichte von nur 2,8 hat. Entweder kann die Dichte von außen nach innen kontinuierlich zunehmen, oder, und dies ergab sich als das Wahrscheinlichste, die Erde besteht aus einer relativ dünnen Steinkruste (etwa 1200 km) und einem Eisenkern. Für einen Eisenkern gerade sprach die große Verbreitung des Eisens in den übrigen Weltkörpern, wie uns außer der Spektralanalyse die Meteoriten zur Genüge beweisen. Wir gingen darauf zu den thermischen Verhältnissen über und fanden, daß in den uns erreichbaren Tiefen die Temperatur proportional der Tiefe zunimmt und zwar im Durchschnitt 1 ° C auf 33 m. (Vergleiche Thomson, Temperaturkurve S. 25.) Wir sind jedoch noch weit davon entfernt, ein Gesetz für die Temperaturzunahme aufstellen zu können, sondern diese Beobachtungen im Verein mit denen an Thermen und Vulkanen zeigen uns nur, daß sich im Innern der Erde eine Wärmequelle befindet, über deren Ursache verschiedene Vermutungen ausgesprochen worden sind. Ich halte es für das

Digitized by Google

einzig Richtige, die innere Erdwärme als Rest der ursprünglichen Ballungswärme anzusehen. Ganz unhaltbar ist die von Treubert und Jaczewski ausgesprochene Ansicht, die Sonne sei die Ursache der inneren Erdwärme, da wir doch schon seit den Beobachtungen von Cassini und De la Hire wissen, daß die Wirkung der Sonne nur bis zur neutralen Schicht reicht. Die dritte Möglichkeit, die innere Erdwärme zu erklären, wäre auf chemischem Wege, und dies ist von Volger und Mohr versucht worden, aber, wie Pfaff nachgewiesen hat, ganz ohne Erfolg. Auch die von Liebenow mit Hilfe des Radiums versuchte Erklärung ist nicht imstande, die Frage zugunsten der chemischen Erklärungsweise zu lösen. Den Abschluß der Betrachtungen über die thermischen Verhältnisse der Erde bildete der Versuch, aus der Temperatur der Laven und der kritischen Temperatur der in größerer Menge auf der Erde vorhandenen Stoffe eine untere und obere Grenze für die Temperatur des Erdinnern zu berechnen, wobei sich die Werte 2000° und 10000° ergaben. Der letzte Abschnitt befaßt sich mit dem Zustand des Erdinnern. Ausgehend von der von Moldenhauer, Ritter, Zöppritz und Günther vertretenen Ansicht, das Erdinnere sei gasförmig, kam ich zu dem Resultat, daß diese Hypothese bis jetzt weder bewiesen noch zur Erklärung der auf der Erde beobachteten Verhältnisse nötig sei. Im Anschluß an die Rittersche Arbeit wurden die Berechnungen für das Alter der Erde behandelt. Die Werte der einzelnen Forscher weichen ziemlich von einander ab. Ritter erhält 40 Millionen Jahre und Kövesligethy gleichfalls mit Hilfe der mechanischen Wärmetheorie 19,87 Millionen Jahre. Während Perry über 400 Millionen Jahre annimmt, findet Thomson aus der Wärmestrahlung nur 20—40 Millionen Jahre und King aus der Abhängigkeit des Schmelzpunktes vom Druck beim Diabas 24 Millionen Jahre. Aus der jährlichen Verkürzung des Erdradius hat Rudzki 62—972 Millionen Jahre berechnet, und Soddy kommt auf Grund der Radioaktivität sogar zu 1000—10000 Millionen Jahren. Als wahrscheinlichster Wert ergab sich mit besonderer Rücksicht auf die Forderungen der Biologie 100 Millionen Jahre, ohne daß es jedoch dabei auf ein paar Millionen Jahre ankommt. Nach dieser kleinen Abschweifung wandten wir uns wieder dem Zustand des Erdinnern zu und zwar den Arbeiten von Falb, Mallet und Lang, die für ein flüssiges Innere eintreten. Zu ihrer Kritik machte es sich nötig, etwas näher auf den Begriff „Zustand" einzugehen, und ich schloß mich der von Tammann gegebenen Einteilung an:

Digitized by Google

I. Isotroper Zustand:	II. Anisotroper Zustand:
1. Gasförmig.	Kristallzustand:
2. Flüssig.	verschiedene polymorphe
3. Amorph.	Kristallarten.

Unter der Voraussetzung, daß sich auch bei höherer Temperatur und höherem Druck die die Erde zusammensetzenden Substanzen analog verhalten, wie bei den uns zu Gebote stehenden Temperaturen und Drucken, ergab sich besonders aus den Beobachtungen von Barus, Doelter und Tammann, daß die Silikate und Metalle mit Ausnahme des Wismuts im isotropen Zustand ein größeres Volumen besitzen, als im anisotropen. Daher wird sich das Erdinnere im anisotropen, allerdings bis zu einem gewissen Grade plastischen, Zustande befinden, wenn der maximale Schmelzpunkt nicht überschritten ist. Außer den genannten Forschern suchen noch Wadsworth, Airy, Hennessy, Woodward, Löffelholz und Toula den flüssigen Zustand des Erdinnern zu erweisen, jedoch mit dem gleichen Erfolg wie die drei zuerst genannten. Den Abschluß des Ganzen bilden die Hypothesen des festen Erdinnern, als deren beste mir die von Wiechert erscheint. Das Resultat der ganzen Betrachtungen ist also, daß die Erde aus einem Nickeleisenkern und einer Silikatkruste besteht, zwischen denen sich eine dünne eisenreiche Übergangsschicht befindet. Die erstarrte, sich wie ein Gewölbe selbst tragende Kruste nimmt mit der Tiefe allmählich an Plastizität zu und geht in die in einem latent kristallisierten Zustand befindlichen Massen über. Je mehr man sich dem Zentrum nähert, um so größer wird der Druck und infolgedessen um so geringer die Verschiebbarkeit der Teilchen, so daß die zentralen Partien äußeren Einflüssen gegenüber als starr erscheinen.

9. Rückblick auf die Entstehung der Erde.

Nachdem wir uns ein Bild vom jetzigen Zustand der Erde zu machen gesucht haben, ist es vielleicht nicht unangebracht zur Ergänzung des oben Gesagten einmal zurückzuschauen, und zu versuchen in großen Zügen die Entwicklung unserer Erde vom Urzustande bis zu den heute beobachteten Verhältnissen kurz zu charakterisieren. Ich bin mir dabei sowohl der Schwierigkeiten eines solchen Unternehmens bewußt, als auch des Umstandes, daß noch vieles eine auf nur schwachen Füßen stehende Hypothese ist, die vielleicht schon in kurzer Zeit durch eine Neuentdeckung auf irgend einem Gebiet der Wissenschaft umgestoßen werden kann. Wenn man aber diese Darstellung unter diesem Gesichtspunkte betrachtet, dann kann sie

Digitized by Google

kein Unheil anrichten, sondern im Gegenteil wird sie deutlich zeigen, wo noch schwache Stellen in unserer Erkenntnis sind, und wo andere, vielleicht Berufenere, einsetzen müssen, um uns der Wahrheit wieder einen Schritt näher zu bringen. Wir nehmen an, daß die ganze unser Sonnensystem zusammensetzende Materie einst in Uratome aufgelöst über einen Raum, größer als der heute von unserem Sonnensystem eingenommene, zerstreut war. Durch eine uns unbekannte Ursache begann die ganze Masse sich zu bewegen, womit gleichzeitig eine Erwärmung und die Bildung von Atomen und Molekülen Hand in Hand ging. Die Masse beginnt sich zu kondensieren, und aus der anfangs wirren Bewegung wird eine Rotation um eine Achse senkrecht zur Ebene der heutigen Planetenbahnen. Mit fortschreitender Kondensation nimmt auch die Rotation zu, bis sie so groß wurde, daß am Äquator die Zentrifugalkraft die zentrale Anziehung überwog, so daß sich hier ein Teil der Masse vom Hauptball als ringförmiges Gebilde abtrennte. Dieser Ring rotierte noch einige Zeit um den Zentralball weiter, bis die infolge der außen und innen verschiedenen Abkühlung auftretenden Konvektionsströme so groß wurden, daß er an einer Stelle durchreißt, worauf sich die ganze Masse zu einer dem Mutterball umkreisenden Kugel zusammenballt. Dieser Vorgang wiederholte sich mehrfach, und auf gleiche Weise trennten sich dann von den Planeten deren Monde ab, wobei möglicherweise die von der Sonne auf den Planeten hervorgebrachte Flut mitgewirkt hat (Darwin). Darwin[169]) hat gezeigt, daß wirklich Erde und Mond einst eine zusammenhängende Masse gewesen sein müssen, da die Zeit der Erdrotation gleich der der Mondrevolution gewesen ist — etwa 3—5 Stunden —, was nur bei einer so kurzen Entfernung möglich ist, daß sich beide Massen berührt haben. In der Folgezeit hat der Monat stets zugenommen, da der Mond etwas langsamer umlief, als sich die Erde drehte. „In diesem Falle mußte die Gezeitenreibung die Umdrehung der Erde verzögern, den Mond aber zwingen, von der Erde zurückzuweichen und somit seine Bahn langsamer zurückzulegen. Demgemäß verlängern sich der ursprüngliche Tag und Monat, doch der letztere nimmt viel schneller zu als der erstere, so daß die Zahl der Tage im Monat wächst. Dies geht so fort, bis jene Zahl ein Maximum erreicht, das im Falle unseres Planeten etwa gleich 29 ist." Nach diesem Zeitpunkte verlängern sich der Tag und Monat, der Tag jedoch schneller als der Monat, so daß die Anzahl der Tage im Monat abnimmt, obgleich beide Größen zunehmen. Während jetzt die Erde $27^1/_3$ Umdrehungen im Monat macht, wird sie schließlich so langsam rotieren, daß sie nur eine macht, trotzdem dann nach Darwin der

Digitized by Google

Monat und der Tag gleich 55 unserer jetzigen Tage betragen wird. Die anfangs aus einem überkritischen homogenen Gasball bestehende Erde beginnt, infolge der Wärmeausstrahlung in den kalten Weltenraum an der Oberfläche in den dampfförmigen und isotrop flüssigen Zustand überzugehen. Die schwereren flüssigen Massen sinken ein, werden jedoch schon nach kurzer Zeit infolge der hohen Temperatur wieder vergast. Gleichzeitig dringen heiße Gasmassen aus dem Innern empor und durch andauernde Wiederholung dieses Spieles sinkt die Gesamttemperatur, bis schließlich der Punkt erreicht ist, der unterhalb der höchsten kritischen Temperatur eines der vorhandenen Stoffe liegt; dann wird dieser sich dauernd in flüssiger Form halten können und bis ins Zentrum einsinken. Bei fortschreitender Abkühlung folgen andere Stoffe nach, und es bilden sich auch die ersten Verbindungen. Im weiteren Verlaufe gehen die zentralen, besonders aus Nickeleisen bestehenden Massen in den labil kristallisierten Zustand über, während sich an der Oberfläche ein Brei von Kristallen bildet, der zu einer zusammenhängenden Kruste erstarrt, die jedoch schon kurz nach ihrer Bildung durch Spannungen und Eruptionen aus dem Innern wieder zertrümmert wird. Dieser Vorgang wiederholt sich öfters, bis sich endlich dauernd eine Kruste halten kann. Nach der Bildung einer festen Kruste geht auch die Abkühlung der noch sehr heißen, an Gasen reichen Atmosphäre ziemlich schnell vor sich. Während sie bis jetzt für jeden Sonnenstrahl undurchlässig ist, beginnt sie sich zu lichten. Nachdem sie sich unter 365 ° abgekühlt hat, fällt das erste Wasser als Regen hernieder. Anfangs wird der Regen die Erdoberfläche überhaupt nicht erreichen, sondern schon nach kurzer Fallzeit wieder in Dampf verwandelt werden, bis dann die ersten Tropfen die Oberfläche erreichen, um jedoch gleichfalls sofort wieder in Dampf verwandelt zu werden. Dauernd vermag sich das Wasser erst dann auf der Erde zu halten, wenn deren Oberflächentemperatur unter 365 ° C, der kritischen Temperatur des Wassers, gesunken ist. Sofort setzt aber auch eine Zerstörung der eben erst gebildeten Kruste ein, und zwar geht diese ziemlich schnell vor sich, da das Wasser aus der Atmosphäre eine Menge Gase, wie z. B. schweflige Säure, Salzsäure etc. mit niedergeschlagen hat. Es bilden sich die ersten Sedimente. So sind wir bis in die Zeit der historischen Geologie vorgeschritten, die ja die weitere Entwicklung unserer Erde lehrt.

Digitized by Google

Fragen wir uns noch, in welcher Weise wir in nächster Zeit unsere Kenntnisse über die in Rede stehenden Fragen bereichern können. Unsere Kenntnisse über die Temperatur und die stoffliche Zusammensetzung der Erde verdanken wir Analogieschlüssen aus der kosmischen Physik und in dieser Richtung dürfte voraussichtlich ein weiterer Aufschluß nicht zu erwarten sein. Dagegen erscheint es mir nicht unmöglich, durch einen erneuten Guß von Kugeln — analog den Untersuchungen von Bischof — mit den verfeinerten Meßinstrumenten der heutigen Technik die Abkühlungsverhältnisse und das Gesetz der Temperaturzunahme in besserer Weise als bisher feststellen zu können, und es wäre daher ein großes Verdienst, das sich die Technik um die Wissenschaft erwerben könnte, wenn zu diesem Zwecke einmal ein Hochofen zur Verfügung gestellt würde. Ferner wäre es, unter der Annahme, daß die von uns angenommenen Stoffe und hohe Temperatur in der Erde wirklich vorhanden sind, von der größten Bedeutung eingehende Untersuchungen über das Verhalten der Silikate und der Eisenlegierungen bei hohen Temperaturen und Drucken anzustellen, da wir darüber bis jetzt so gut wie nichts wissen.

Digitized by Google

Literaturverzeichnis.

1) Plato, Phaedon 113 A. B.
2) Zöckler, Geschichte der Beziehungen zwischen Theologie und Naturwissenschaft mit besonderer Rücksicht auf die Schöpfungsgeschichte, I, S. 131, 132. Gütersloh 1877.
3) Maurer, K., Die Hölle auf Island. Zeitschrift des Vereins für Volkskunde, herausgegeben von K. Weinhold 1894, IV, S. 256—269.
4) Rixner-Siber, Leben und Lehrmeinungen berühmter Physiker am Ende des 16. und Anfang des 17. Jahrhunderts, S. 177. Sulzbach 1824. S. 345*).
5) Kircher, A., Mundus subterraneus. Amsterdam 1665.
6) Boyle, Traktatus de temperie subterranearum regionum. Opera varia, I, F_2—H_4. Genf 1680.
7) Halley, On the Structure of the Internal of the Earth and the Concav habitated of the Stell. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1692, p. 563. S. 345*).
8) Leibniz, Protogaea, sive de prima facie telluris et antiquissimae historiae vestigiis in ipsis natura monumentis, p. 2, 32. Göttingen 1749.
9) Boerhave, Elementa Chemiae, I, p. 479. Leiden 1732.
10) Aepinus, Reflexions concernant la distribution de la chaleur sur le globe de la terre. St. Petersburg 1761. Traduites par Raoult
11) Cassini de Thury, J. D., Sur la température des souterrains de l'observatoire royal. Mémoires présentés par divers savants à l'académie Française, 1786, p. 511. S. 328, 329*).
12) Hann, Handbuch der Klimatologie, 1883. S. 32.
13) v. Richthofen, F., Führer für Forschungsreisende, S. 65.
14) Marschall v. Bieberstein, C. W. und E. F. L., Untersuchung über den Ursprung und die Ausbildung der gegenwärtigen Anordnung des Weltgebäudes. Gießen-Darmstadt 1802. S. 345*).
15) Gehlers physikalisches Wörterbuch, 2. Aufl.
16) Fischer, J. C., Geschichte der Naturlehre, VI, S. 881. Göttingen 1805.
17) Franklin, Conjectures concerning the formation of the Earth. Transactions of the Society of Philadelphia, III, No. 1. S. 354*).
18) Lichtenberg-Gamauf, Erinnerungen an Vorlesungen über physische Geographie, S. 378. Wien 1818. S. 354*).
19) Günther, Die Entwicklung der Lehre vom gasförmigen Zustande des Erdinnern Jahresbericht der geographischen Gesellschaft in München 1890, 1891, Heft XIV, S. 1—20.

*) Nach Günther, Handbuch der Geophysik, 2. Aufl., I. Stuttgart 1897.

Digitized by Google

20) Steinhäuser, Nähere Bestimmung der Bahn des Magnets im Innern der Erde. Gilberts Annalen, LVII (XXVII, N. F.), 1817, S. 393—418.

21) Steinhäuser, Beweis, daß im Innern der Erde ein Planet befindlich ist. Gilberts Annalen LXI (I, N. F.), 1819, S. 75—97.

22) Chladni, Einige Ideen über das Innere der Erde. Gilberts Annalen, LXII (II, N. F.), 1819, S. 72—79.

23) Fourier, Théorie analytique de la chaleur; deutsch von Weinstein, S. 9. Berlin 1884.

24) Fourier, Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires. Annales de Chimie et de Physique XXVII, p. 136—167. Paris 1824.

25) Cordier, Neue Beobachtungen über die Temperatur im Innern der Erde. Poggendorffs Annalen, LXXXIIX (XIII, N. F.), 1828, S. 363—366.

26) Fox, Observations faites dans les mines de Cornuailles, et communiquées, le 21 septembre 1819, à la Société géologique de ce Comté. Annales de Chimie et de Physique, XIII, p. 200—204. Paris 1820.

27) Schmidt, J. C. Eduard, Lehrbuch der mathematischen und physischen Geographie, Göttingen 1829, 1830.

28) Laplace, Mécanique céleste, Tom. V, p. 18 u. 72.

29) Cavendish, Versuche, um die Dichtigkeit der Erde zu bestimmen. Gilberts Annalen der Physik, II, 1799, S. 1—62.

30) Magnus, Beschreibung eines Maximumthermometers und einiger damit angestellten Versuche in einem Bohrloche zu Rüdersdorf. Poggendorffs Annalen, XCVIII (XXII, N. F.), 1831, S. 136—150.

31) Walferdin, Sur un nouveau thermomètre à maxima. Comptes rendus, II, 1836, S. 505.

32) Kupffer, Über die mittlere Temperatur der Luft und des Bodens auf einigen Punkten des östlichen Rußlands. Poggendorffs Annalen. XCI (XV, N. F.), 1829, S. 159—192.

33) Erman, Über die mit der Tiefe wachsende Temperatur der Erdschichten, nach Beobachtungen im Bohrloch zu Rüdersdorf. Abhandlungen der Königl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, physikalische Klasse, XVII, 1831, S. 269—284.

34) Gerhard, Beobachtungen über die Temperatur im Innern der Erde, angestellt auf verschiedenen Bergwerken im preußischen Staate. Poggendorffs Annalen. XCVIII (XXII, N. F.), 1831, S. 497—533.

35) Gerhard, Fernere Resultate der im Bohrloch zu Rüdersdorf angestellten Temperaturbeobachtungen. Poggendorffs Annalen, CIV (XXVIII, N. F.), 1833, S. 233—235.

36) Kupffer, Bemerkungen über die Temperatur in den tieferen Erdschichten. Poggendorffs Annalen, CVIII (XXXII, N. F.), 1834, S. 284—288.

37) Reich, Beobachtungen über die Temperatur des Gesteins in verschiedenen Tiefen in den Gruben des sächsischen Erzgebirges in den Jahren 1830—1832. Freiberg 1834.

38) Poisson, Théorie mathématique de la chaleur; Auszug deutsch: Von den Ursachen der Temperatur des Erdballs. Poggendorffs Annalen, CXV (XXXIX, N. F.), 1836, S. 66—100.

39) Lamont, Erklärung der Wärmezunahme im Innern der Erde, nach Herrn Poisson. Jahrbuch der Königl. Sternwarte in München, 1838, 1. Jahrg., S. 203—207.

40) Naumann, Lehrbuch der Geognosie, 2. Aufl., I. Leipzig 1858.

41) A. v. Humboldts Werke, I, S. 294. S. 342*).

42) d'Archiac, Histoire des progrès de la géologie, I, p. 29. Paris 1847. S. 342*).

43) Pilar, Grundzüge der Abyssodynamik, S. 23. Agram 1881. S. 342*).

44) Bischof, Die Wärmelehre des Innern unseres Erdkörpers, ein Inbegriff aller mit der Wärme in Beziehung stehender Erscheinungen in und auf der Erde. Leipzig 1837.

Digitized by Google

45) Middendorff, Bericht über den Scherginschacht zu Jakutsk. Poggendorffs Annalen, CXXXVIII (LXII, N. F.), 1844, S. 404—415.

46) Bär, Über notwendig scheinende Ergänzungen der Beobachtungen über die Bodentemperatur in Sibirien. Poggendorffs Annalen, CLVI (LXXX, N. F.), 1850, S. 242—261.

47) Parrot, Über Knochenhöhlen und Zentralfeuer. Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefaktenkunde, I, 1830, S. 334—336.

48) Klöden, Über die Zunahme der Temperatur nach dem Innern der Erde. Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefaktenkunde, II, 1831, S. 385—390.

49) Bischof, Über das Gesetz der Temperaturzunahme nach dem Innern der Erde. Poggendorffs Annalen, CXI (XXXV, N. F.), 1835, S. 209—221.

50) Poggendorff, Beobachtungen an artesischen Brunnen, besonders hinsichtlich der Temperatur im Innern der Erde. Poggendorffs Annalen, CXIV (XXXVIII, N. F.), 1836, S. 593—601.

51) Suckow, Zur Geologie und Mineralogie. 1. Erörterung der Frage: Ob die Intensität der Erdwärme vom Mittelpunkt der Erde aus mit dem Quadrate der Entfernung abnimmt? Zeitschrift für die gesamten Naturwissenschaften, 1855, VI, S. 261, 262.

52) Hopkins, W., Researches in physikal Geologie.

a) On the Phenomena of Precession and Nutation, assuming the Fluidity of the Interior of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London 1839, Vol. CXXIX, p. 381—423.

b) On Precession and Nutation, assuming the Interior of the Earth to be fluid and heterogeneous. Philos. Trans. 1840, Vol. CXXX, p. 193—208.

c) On the Thickness and Constitution of the Earth's Crust. Philos. Trans. 1842, Vol. CXXXII, p. 43—55.

53) Toula, F., Verschiedene Ansichten über das Innere der Erde. Wien 1899.

54) Bischof, a) Mitteilungen, an den Geheimrat von Leonhard gerichtet. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefaktenkunde, 1841, S. 565, 566.

b) Versuche, die Kontraktion zu bestimmen, welche geschmolzene Massen erleiden, wenn sie in den festen Zustand übergehen und kristallinische Gesteine bilden, nebst allgemeinen Betrachtungen über diese Gesteine. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie nnd Petrefaktenkunde, 1843, S. 1—54.

55a) Matteuci, Note sur la température du fond d'un puits de la maremme toscane. Comptes rendus de l'Académie des sciences, XVI, 1843, p. 937, 938.

55b) Pilla, Sur la température d'un puits ouvert à Monte Massi, près de Grossetto, en Toscane. Ebenda, S. 1319—1327.

56) Mandelsloh, Beobachtungen über die Zunahme der Erdwärme in dem 1186 württemb. Fuß tiefen Bohrloche zu Neuffen, angestellt mit dem Magnusschen Geothermometer. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefaktenkunde, 1844, S. 440 bis 443.

57) Daubrée, Observation sur la haute température observée dans un puits foré a Neuffen (Wurttemberg). Comptes rendus de l'Académie des sciences, XXI, 1845, p. 1335, 1336.

58) Bischof, Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie, I, S. 139, 140. Bonn 1847.

59) Branco, a) Schwabens 125 Vulkanembryonen und deren tufferfüllte Ausbruchsröhren, das größte Gebiet ehemaliger Maare auf der Erde, S. 103—150. Stuttgart 1894.

b) Über H. Höfers Erklärungsversuch der hohen Wärmezunahme im Bohrloche zu Neuffen. Zeitschrift der Deutschen geologischen Gesellschaft LVI, 1904. Briefliche Mitteilungen, S. 174—182.

Digitized by Google

60) Humboldt, Kosmos, I, 1845; IV, 1858.

61) Leslie, Das Innere der Erde. Zeitschrift für Physik und Mathematik von Baumgartner und Ettinghausen, VI, S. 255, 256. Wien 1829.

62) Lamont, Über die im Königreich Bayern während des Herbstes 1854 ausgeführten magnetischen Messungen. Poggendorffs Annalen, CLXXI (XCV, N. F.), 1855, S. 476—481.

63) Walferdin, Observation sur la source artésienne de l'établissement thermal de Mondorff dans le grand-duchéde Luxembourg. Comptes rendus de l'Académie des sciences, XXXVI, 1853, p. 250—254.

64) Studer, Lehrbuch der physikalischen Geographie und Geologie, II, S. 34—48. Bern 1847.

65) W. Thomson: On the Rigidity of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London, CLIII, 1863, p. 573—582.

66) Thomson und Tait, Handbuch der theoretischen Physik; deutsch von Helmholtz und Wertheim, I_2. Braunschweig 1874.

67) Poulett Scrope, On Vulcanoes; deutsch von A. v. Klöden. Berlin 1872.

68) Delaunay, Sur l'hypothèse de la fluidité intérieure du globe terrestre. Comptes rendus, L. XVII, 1868, p. 65—70.

69) Sterry Hunt, a) The Chemistry of the primeval earth. Geol. Mag. 1868.

b) Über den wahrscheinlichen Sitz der vulkanischen Kraft. Geol. Mag. 1869 (nach [58]) S. 42).

70) Clarke, Analyses of rocks from the laboratory of the United States Geological Survey 1880 to 1903, p. 18, 19. Washington 1904.

71) James, a) On the Deflection of the Plumb-line at Arthur's Seat, and the Mean Specific Gravity of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London 1856, Vol. CXLVI, p. 591—606.

b) On the Figure, Dimensions, and Mean Specific Gravity of the Earth, as derived from the Ordnance Trigonometrical Survey of Great Britain and Ireland. Ebenda, S. 607—626.

72) Fresdorf, Die Methoden zur Bestimmung der mittleren Dichte der Erde. Wissenschaftliche Beilage zum Jahresbericht des Gymnasiums zu Weißenburg i. Els., 1894.

73) Mendenhall, a) Determination of the Acceleration due to the Force of Gravity, at Tokio, Japan. The American Journal of Science, III. Serie, XX, 1880, p. 124—132.

b) On a Determination of the Force of Gravity at the Summit of Fujiyama, Japan. The American Journal of Science, III. Serie, XXI, 1881, p. 99—103.

74) Airy, Account of Pendulum Experiments undertaken in the Harton Colliery, for the purpose of determining the Mean Density of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London, 1856, Vol. CXLVI, p. 297—342.

75) Airy, Über die in der Kohlengrube von Harton zur Bestimmung der mittleren Dichte der Erde unternommenen Pendelbeobachtungen. Poggendorffs Annalen, CLXXIII (XCVII, N. F.), 1856, S. 599—605.

76) Haughton, Über die Dichtigkeit der Erde, hergeleitet aus den Versuchen des Königl. Astronomen (Herrn Airy) in der Kohlengrube zu Harton. Poggendorffs Annalen, CLXXV (XCIX, N. F.), 1856, S. 332—334).

77) Behm, Geographisches Jahrbuch; herausgegeben von H. Wagner.

78) Helmert, Die mathematischen und physikalischen Theorien der höheren Geodäsie, II. Leipzig 1884.

79) Reich, Versuche über die mittlere Dichtigkeit der Erde mittelst der Drehwage. Freiberg 1838.

Digitized by Google

80) Cornu et Baille, a) Détermination nouvelle de la constante de l'attraction et de la densité moyenne de la Terre. Comptes rendus de l'Académie des sciences, LXXVI, 1873, p. 954—958.

b) Sur la mesure de la densité de la Terre. Comptes rendus de l'Academie des sciences, LXXXVI, 1878, p. 699—702.

81) v. Jolly, Die Anwendung der Wage auf Probleme der Gravitation. Wiedemanns Annalen, CCXLI (V, N. F.), 1878, S. 112—134; CCL (XIV, N. F.), 1881, S. 331 bis 355.

82) Poynting, a) On a method of a using the Balance with great delicacy, and on its employment to determine the Mean Density of the Earth. Proceedings of the Royal Society of London, 1878/79, Vol. XXVIII. p. 2—35.

b) On a Determination of the Mean Density of the Earth and the Gravitation constant by means of the Common Balance. Philos. Trans. of the Royal Society of London, 1891, CLXXXII A, p. 565—656.

83) König und Richarz, Eine neue Methode zur Bestimmung der Gravitationskonstante. Sitzungsberichte der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1884, II, S. 1203—1205.

84) Richarz und Krigar-Menzel: Gravitationskonstante und mittlere Dichtigkeit der Erde, bestimmt durch Wägungen. Sitzungsberichte der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1896, II, S. 1305—1308.

85) Wilsing, a) Über die Anwendung des Pendels zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde. Sitzungsberichte der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1885, I, S. 13—15.

b) Mitteilung über die Resultate von Pendelbeobachtungen zur Bestimmung der mittleren Dichtigkeit der Erde. Sitzungsberichte der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1887, I, S. 327—334.

86) Lipschitz, Versuch zur Herleitung eines Gesetzes, das die Dichtigkeit für die Schichten im Innern der Erde annähernd darstellt, aus den gegebenen Beobachtungen. Crelles Journal für reine und angewandte Mathematik, 1863, LXII, S. 1—35 *).

87) Darwin, G. H., On the Figure of Equilibrium of a Planet of Heterogeneous Density. Proceeding of the Royal Society of London, XXXVI, 1883/84, p. 158—166.

88) Stieltjes, Quelques remarques sur la variation de la densité dans l'intérieur de la terre. Archives Néerlandaises des sciences exactes et naturelles, XIX, 1884, p. 435—460.

89) Callandreau, a) Sur la constitution intérieure de la terre. Comptes rendus de l'Academie des sciences, C, 1885, p. 37—40,

b) Addition à deux notes précédentes, concernant la théorie de la figure des planètes et de la terre. Ebenda. p. 163, 164.

c) Sur la théorie de la figure de la terre. Ebenda, p. 1204—1206.

90) Radau, Sur la loi des densités à l'intérieur de la terre, No. [89], p. 972—974.

91) Tisserand, a) Quelques remarques au sujet de la théorie de la figure des planètes. Comptes rendus de l'Academie des sciences, XCIX, 1884, p. 390—403.

b) Observations à propos d'une Communication précédente sur la théorie de la figure des planètes. Ebenda, p. 518.

c) Sur la théorie de la figure de la terre. Ebenda, p. 577—583.

*) Günther gibt in seinem schon erwähnten Handbuch der Geophysik, Bd. LXXXIV, an, was jedoch falsch ist, wie ein großer Teil seiner Literaturangaben. Wenn ich auch nur diese eine Gelegenheit benutze, besonders darauf hinzuweisen, so wird ein Vergleich seiner und meiner Angaben dies leicht zeigen.

Digitized by Google

92) Stapff, Über die Zunahme der Dichtigkeit der Erde nach ihrem Innern. Beiträge zur Geophysik. Zeitschrift für physikalische Erdkunde (Gerland). 1895, II, S. 1—24.

93) Tumlirz, Die Dichte der Erde, berechnet aus der Schwerebeschleunigung und der Abplattung. Sitzungsberichte der mathem.-naturwiss. Klasse der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften zu Wien, 1892, CI, Abt. IIa, S. 1528—1536.

94) Dana, On some Results of the Earth's Contraction from cooling, including a discussion of the Origin of Mountains, and the Nature of the Earth's Interior. The American Journal of Science and Arts, 1873, III, Serie V, p. 423—443; VI, p. 6—14.

95) Wiechert, Über die Massenverteilung im Innern der Erde. Nachrichten von der Königl. Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathem.-physik. Klasse, 1897, S. 221—243.

96) Günther, Handbuch der Geophysik, I, 2. Aufl. Stuttgart 1897.

97) Stapff, a) Wärmezunahme nach dem Innern von Hochgebirgen. Bern 1880.

b) Drei Vorträge, gehalten in der 55. Versammlung Deutscher Naturforscher und Ärzte zu Eisenach 1882.

98) Kayser, Lehrbuch der Geologie, I, 2. Aufl., 1905.

99) Supan, a) Neueste Messungen der Tiefentemperatur der festen Erdkruste. Petermanns geographische Mitteilungen, 1895, XLI, S. 294.

b) Die abnorme geothermische Tiefenstufe der Keweenaw-Halbinsel. Petermanns geographische Mitteilungen, 1896, XLII, S. 42, 43.

100) Roth, Über die Temperaturbeobachtungen in dem Bohrloche von Sperenberg unweit Berlin. Poggendorffs Annalen, 1873, CCXXIV (CXLVIII, N. F.), S. 168—171.

101) Dunker, a) Über die Benutzung tiefer Bohrlöcher zur Ermittlung der Temperatur des Erdkörpers und die deshalb in dem Bohrloche I zu Sperenberg auf Steinsalz angestellten Beobachtungen. Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen in dem Preußischen Staate, 1872, S. 206.

b) Dasselbe, Zeitschrift für die gesamten Naturwissenschaften, 1872, VI, N. F. (XL d. g. F.), S. 319—377.

c) Über die möglichst fehlerfreie Ermittelung der Wärme des Innern der Erde und das Gesetz ihrer Zunahme mit der Tiefe. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1877, S. 590—606.

d) Über die Wärme im Innern der Erde und ihre möglichst fehlerfreie Ermittelung. Stuttgart 1896.

e) Ausug aus d) in Zeitschrift für praktische Geologie, 1896, S. 417—433.

102) Henrich, a) Über die Temperaturen im Bohrloche zu Sperenberg und die daraus gezogenen Schlüsse. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1876, S. 716—723.

b) Über die Temperatur im Bohrloche zu Sperenberg. Zeitschrift für mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterricht (J. C. V. Hoffmann), 1878, IX, S. 248—249.

103) Hottenroth, Über das Gesetz der Temperaturzunahme nach der Tiefe unter Zugrundelegung der Dunkerschen Beobachtungen im Bohrloch zu Sperenberg. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1877, S. 607—615.

104) Henrich, Über die Temperaturen in dem Bohrloche zu Sperenberg und die darüber angestellten Rechnungen und Schlüsse. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1877, S. 897—905.

105) Brauns, Zur Frage über die Temperatur des Erdinnern. Gaea. (H. J. Klein), 1878, XIV, S. 490—492.

106) v. Lasaulx, Sitzungsberichte der niederrheinischen Gesellschaft für Natur- und Heilkunde in Bonn, 1875, S. 134.

Digitized by Google

107) Dunker, E., Über die Temperaturbeobachtungen im Bohrloche zu Schladebach. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1889, I, S. 29—47.

108) Henrich, Über die Temperaturverhältnisse in dem Bohrloch Paruschowitz V. Zeitschrift für praktische Geologie, 1904, XII, S. 316—320.

109) Prestwich, a) On Underground Temperatures, with Observations on the Conductivity of Rocks, on the Thermal Effects of Saturation and Imbibition, and on a special Source of Heat in Mountain Ranges. Proceedings of the Royal Society of London, 1884/85, XXXVIII, p. 161—168.

b) Wagners geographisches Jahrbuch, 1887, XI, S. 219.

110) Jaczewski, Über das thermische Regime der Erdoberfläche im Zusammenhang mit den geologischen Prozessen. Verhandlungen der Kaiserl. Russ. Mineralogischen Gesellschaft, XLII, 1905, S. 243—383.

111) Pfaff, Allgemeine Geologie als exakte Wissenschaft. Leipzig 1873.

112) Volger, Erde und Ewigkeit, S. 156*).

113) Mohr, Geschichte der Erde, 2. Aufl. Bonn 1875.

114) Mohr, Über die Ursache der Erdwärme. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1875, S. 371—377.

115) Küppers, Bemerkungen zu „Franz Treubert, Die Sonne als Ursache der hohen Temperatur in den Tiefen der Erde, der Aufrichtung der Gebirge und der vulkanischen Erscheinungen. München 1904." Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1905, S. 82—85.

116) Liebenow, Notiz über die Radiummenge der Erde. Physikalische Zeitschrift, 1904, V, S. 625, 626.

117) Guldberg, Die kritischen Temperaturen der Metalle. Zeitschrift für physikalische Chemie, I, 1887, S. 231—236.

118) Moldenhauer, Zur Entwicklungsgeschichte des Erdballes. Gaea (H. J. Klein), 1874, X, S. 214—231, 279—292, 348—368, 411—422, 474—485, 541—553, 603 bis 608, 688—693, 730—742; 1875, XI, S. 37—41, 107—115, 180—187, 216 bis 223, 285—294, 348—357, 417—426, 479—487, 549—555, 622—629, 673—681.

119) Ritter, a) Untersuchungen über die Höhe der Atmosphäre und die Konstitution gasförmiger Weltkörper. Wiedemanns Annalen der Physik, 1878, Bd. CCXLI (V, N. F.), S. 405—425, 543—558; 1879, Bd. CCXLII (VI, N. F.), S. 135—144; Bd. CCXLIV (VIII, N. F.), 1879, S. 157—183; 1880, Bd. CCXLVI (X, N. F.), S. 130—143.

b) Anwendungen der mechanischen Wärmetheorie auf kosmologische Probleme. Hannover 1879.

120) Zöppritz, K., Über die Mittel und Wege, zu besserer Kenntnis vom inneren Zustand der Erde zu gelangen. Verhandlungen des 1. Deutschen Geographentages zu Berlin am 7. und 8. Juni 1881, S. 15—28.

121) Darwin, G. H., a) On the Precession of a Viscous Spheroid, and on the remote History of the Earth. Philos. Trans. of the Royal Society of London, 1879, CLXX, II, p. 447—538.

b) Abstract. Proceedings of the Royal Society of London, 1878/79, Vol. XXVIII, p. 184—194.

122) Oppenheim, Über die Rotation und Präzession eines flüssigen Sphäroids. Sitzungsberichte der Kaiserl. Akademie der Wissenschaften zu Wien, mathem.-naturwiss. Klasse, 1885, XCII, II, S. 528—574.

*) Nach Pfaff[111]), S. 12 ff.

Digitized by Google

123) Darwin, G. H., On the Bodily Tides of Viscous and Semi-elastic Spheroids, and on the Ocean Tides upon a Yielding Nucleus. Philos. Trans. of the Royal Society of London, 1879, Vol. CLXX, I, p. 1—35.

124) Clarence King, The Age of the Earth. American Journal of Science, 1893, III. Serie, XLV, p. 1—20.

125) Fisher, O., Rigidity not to be relied upon in estimating the Earth's Age, No. [124]), p. 464—468.

126) Kövesligethy, Über die Entwicklung der Himmelskörper und das Alter der Erde. Mathematische und naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn, 1901, XIX. Leipzig, Teubner, 1904, S. 204—223.

127) Soddy, F., Die Radioaktivität vom Standpunkt der Desaggregationstheorie elementar dargestellt; deutsch von G. Siebert, S. 191. Leipzig 1904.

128) Darwin, G. H., On the Influence of Geological Changes on the Earths Axis of Rotation. Philos. Trans. of the Royal Society of London, 1877, CLXVII, I, p. 271 bis 312.

129) Schiaparelli, De la rotation de la terre sous l'influence des actions géologiques. Mémoire présenté à l'observatoire de Poulkova à l'occasion de sa fête semiséculaire. St. Petersburg 1889.

130) Falb, R., Grundzüge zu einer Theorie der Erdbeben und Vulkanausbrüche, 2. Aufl. Graz 1886.

131) Mallet, R., a) Volcanic energy: an attempt to develop its true origin and cosmical relations. Philos. Trans. of the Royal Soc. of London, 1873, CLXIII, I, p. 147—227.

b) Über vulkanische Kraft: ein Versuch, ihre wirkliche Ursache und ihre kosmischen Beziehungen zu entwickeln; deutsch von A. v. Lasaulx. Verhandlungen des naturhistorischen Vereins der preußischen Rheinlande und Westfalens, 1875, XXXII (IV. Folge II), S. 125—269.

c) Auszug von O. Lang. Göttingische gelehrte Anzeigen, 1875, Bd. II, S. 1614 bis 1632.

132) Roth, Über die neue Theorie des Vulkanismus des Herrn R. Mallet. Zeitschrift der Deutschen geologischen Gesellschaft, 1875, XXVII, S. 550—573.

133) Lang, O., Die Bildung der Erdkruste. Zeitschrift für die gesamten Naturwissenschaften, 1873, VII, N. F. (XLI, d. g. F.), S. 1—80.

134) Zirkel, Lehrbuch der Petrographie, I, S. 422, 423. Bonn 1866.

135) Lang, Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1876, S. 525—527.

136) Millar, a) Floating cast iron. Nature, 1878, XVI, p. 23, 24.

b) Floating of solid on molten metal. Nature, 1878, XVIII, p. 464.

c) Rep. Brit. Assoc. for the Adv. of Sc. 1884, p. 653 (nach No. [77], 1887, XI, p. 220).

137) Whitley, Experiments on the relative specific gravities of solid and melted materials at the temperature of fusion. Nature, 1878, XVIII, p. 397, 398.

138) Siemens, a) Physikalisch-mechanische Betrachtungen, veranlaßt durch eine Beobachtung der Tätigkeit des Vesuvs im Mai 1878. Monatsberichte der Königl. Preuß. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1878, S. 558—582.

b) Über die Beschaffenheit des Erdinnern. Dinglers Polytechnisches Journal, 1880, CCXXXV, S. 469.

139) Nies-Winkelmann, a) Über Volumenänderungen einiger Metalle beim Schmelzen. Wiedemanns Annalen, 1881, CCXLIX (N. F., XIII), S. 43—83; und Sitzungsberichte der mathem.-physik. Klasse der Königl. Bayr. Akademie der Wissenschaften zu München, 1881, XI, S. 63—112.

Digitized by Google

b) Zur Volumenänderung der Metalle beim Schmelzen. Wiedemanns Annalen, 1883, CCLIV (N. F., XVIII), S. 364, 365.

140) Nies, Über das Verhalten der Silikate beim Übergange aus dem glutflüssigen in den festen Aggregatzustand. Programm zur 70. Jahresfeier der Königl. Württemb. landwirtschaftlichen Akademie Hohenheim. Stuttgart 1889.

141) Vincenti und Omodei, Atti della R. Acc. d. Torino, 1887, XXII, XXIII; 1889, XIII und 1891, XV (nach [77]).

142) Wadsworth, On the evidence that the earth's interior is solid. The American Naturalist, 1884, XVIII, p. 587—594, 678—686, 767—773.

143) Barus, a) Hight temperature work in igneous fusion and ebullition, chiefly in relation to pressure. Bulletin of the United States Geological Survey, 1893, No. 103.

b) The fusion constants of igneous rock. — Part. II. The contraction of molten igneous rock on passing from liquid to solid. Philosophical Magazine, 1893, V. Serie, XXXV, p. 173—190.

144) Doelter, a) Die Dichte des flüssigen und des festen Magmas. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie, 1901, S. 141—157.

b) Handbuch der angewandten physikalischen Chemie, Bd. II. Physikalisch-chemische Mineralogie. Leipzig 1905.

c) Petrogenesis. Die Wissenschaft, Heft XIII. Braunschweig 1906.

145) Tammann, Kristallisieren und Schmelzen, ein Beitrag zur Lehre der Änderungen des Aggregatzustandes. Leipzig 1903.

146) Sieberg, Handbuch der Erdbebenkunde. Braunschweig 1904, S. 11—14.

147) Tammann, a) Über den Einfluß des Druckes auf die Umwandlungstemperatur des Eisens. Zeitschr. f. anorganische Chemie, 1903, XXXVII, S. 448—454.

b) Der Zustand des Eisens im Erdinnern. Naturwissenschaftl. Wochenschrift 1904, XIX, (N. F., III), S. 393.

148) Airy, The interior of the earth. Nature 1878, XVIII, p. 41—44.

149) Hennessy, a) On the limits of hypotheses regarding the properties of the matter composing the interior of the earth. Philosophical Magazine 1878, V. Serie, VI, p. 263—267.

b) On the physical structure of the earth. Philosoph. Magazine 1886, V. Serie, XXII, p. 233—251.

150) Woodward, The mathematical theories of the earth. The American Journal of science 1889, III. Serie, XXXVIII, p. 337—355.

151) Löffelholz v. Colberg, Die Drehung der Erdkruste in geologischen Zeiträumen. München 1886.

152) Shaler, On the formation of mountain chains. Proceedings of the Boston Society of Natural History, 1866—1868, Vol. XI, p. 8—15.

153) Reyer, Theoretische Geologie. Stuttgart 1888, S. 193—210.

154) Roche, Sur l'état intérieur du globe terrestre. Comptes rendus de l'Académie des sciences, 1881, XCIII, p. 364, 365.

155) Barnard, On the internal structure of the earth considered as affecting the phenomena of precession and nutation. Smithsonian Contributions to Knowledge 1877, No. 310.

156) Fisher, O., Physics of the earth's crust. 2. Aufl., London 1889.

157) Fischer, A., Osmond Fishers Theorie der Entstehung der Unebenheiten der Erdrinde. Zeitschrift für wissenschaftliche Geographie (Kettler). Weimarer geogr. Institut, 1891, Bd. XVII, S. 39—52, 73—79.

Digitized by Google

158) Fisher, O., a) On the effect upon the Ocean-tides of a Liquid Substratum beneath the Earth's Crust. Philosophical Magazine 1882, V. Serie, XIV, p. 213—225.

b) An attempt to explain certain geological phenomena by the application to a liquid substratum of Henry's law of the absorption of gases. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1886—1889, VI, p. 19—24.

c) On the Variations of Gravity at certain Stations of the Indian Arc of the Meridian in Relation to their Bearing upon the Constitution of the Earth's Crust. Philosophical Magazine 1886, V. Serie, XXII, p. 1—29.

159) Newcomb, On the law and the period of the variation of terrestrial latitudes. Astronomische Nachrichten 1892, Bd. CXXX.

160) Rudzki, Note on the Rigidity of the Earth. Philosophical Magazine 1894, V. Serie, XXXVIII, p. 218—224.

161) Rinne, F., Die Erdtiefe. Prometheus 1894, V, S. 6—8.

162) Becker, An elementary proof of the Earth's Rigidity. The American Journal of Science 1890, III. Serie, XXXIX, p. 336—352.

163) Láska, Ziele und Resultate der modernen Erdforschung. IV. Das Erdinnere. Sonderabdruck aus Natur und Offenbarung, Bd. L. Münster 1904.

164) Kelvin, The age of the earth. Nature 1894/95, LI, p. 438—440.

165) Perry, On the age of the earth. Nature 1894/95, LI, p. 224—227.

166) Kelvin, The age of the Earth as an Abode fitted for Life. Philosophical Magazine, 1899, V. Serie, XLVII, p. 66—90.

167) Rudzki, a) Über eine Methode, die Dauer der geologischen Zeit zu schätzen. Petermanns geographische Mitteilungen, 1895, XLI, S. 147—149.

b) Sur l'âge de la terre. Anzeiger der Akademie der Wissenschaften in Krakau, mathem.-naturwiss. Klasse, 1901, S. 72—94.

168) Joly, a) An estimate of the geological age of the Earth. The scientific Transactions of the Royal Dublin Society, 1902, II. Serie, VII, p. 23—66.

b) Referat von O. Fisher, Geological Magazine, New Series, 1900, Decade IV, Vol. VII, p. 124—132.

c) Neuere Betrachtungen über das geologische Alter der Erde. Petermanns geographische Mitteilungen, 1901, XLVII, S. 69—71.

169) Darwin, G. H., Ebbe und Flut, sowie verwandte Erscheinungen im Sonnensystem. Leipzig 1902.

170) Deskartes, Prinzipia philosophiae 1844.

171) Newton, Philosophiae naturalis principia mathematica, 1687.

172) Winkelmann, Handbuch der Physik, 2. Aufl., III, 1, S. 486, 504, 505, 507.

173) Brauns, R., Über Beziehungen zwischen dem Schmelzpunkt von Mineralien, ihrer Zonenstruktur und Ausscheidungsfolge in Ergußgesteinen. Temperatur der Laven. Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen, 1898, N. F., XVII, S. 485—491.

174) Hergesell, Die Abkühlung der Erde und die gebirgsbildenden Kräfte. Gerlands Beiträge zur Geophysik, 1895, II, S. 153—184.

175) Branco, Wirkungen und Ursachen der Erdbeben. Rede am Geburtstage Sr. Maj. des Kaisers und Königs Wilhelms II. in der Aula der Königl. Friedrich Wilhelms-Universität zu Berlin am 27. Januar 1902, S. 65. Berlin 1902.

176) Lehmann, O., Flüssige Kristalle. Leipzig 1904.

177) Frech, F., Studien über das Klima der geologischen Vergangenheit. Zeitschrift der Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin 1902, S. 611—629; 1906, S. 533—553.

LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA

Digitized by Google

Alphabetisches Autorenverzeichnis.

(Die Ziffern bedeuten die Seitenzahlen.)

Aepinus 3, 28.
Airy 30, 32, 81.
Archiac 9.
Arrhenius 64.
Bär 10.
Baily 31, 32.
Barnard 83.
Barus 61, 76.
Becker 85.
Belli 19.
Berget 32.
Bieberstein 3, 28.
Bischof 9, 11—14, 16, 17, 28.
Boerhave 2.
Boussingault 3.
Boyle 2.
Branco 17.
Brauns 43, 51.
Bruno 2.
Callandreau 33, 34.
Carlini 6, 32.
Cassini 3, 28.
Cavendish 6, 31, 32.
Chladni 4.
Clarke 29.
Cordier 4, 7, 21, 28.
Cornu et Baille 31, 32.
Dana 35.
Daubrée 17.
Darwin 33, 58, 65.
Delaunay 26, 29.
Deskartes 2, 28.
Dölter 77.
Dunker 39—44.
Erman 7.
Falb 65.
Fischer, J. C. 3.
Fischer, A. 83, 84.
Fisher, O. 62, 83, 84.
Fourier 4, 29.
Fox 4.
Franklin 3, 28, 52.
Frech 64.
Gerhard 7.
Günther 36, 59, 60, 65.
Guldberg 52.
Halley 2, 28.
Hann 45.
Haugthon 30, 32.
Helmert 30, 34.
Hennessy 82.
Henrich 42, 44.
Hergesell 64.
De la Hire 3, 28.
Hopkins 15, 21, 58.
Hottenroth 42.
Humboldt 9, 18, 19.
Hunt 27, 28.
Hutton 6, 32.
Jaczewski 44, 48—56.
James 30, 32.
v. Jolly 31, 32.
Joly 63.
Kant 36.
King 61, 62.
Kircher 2, 28.
Klöden 11.
König 31.
Kövesligethy 63.
Krigar-Menzel 31, 32.
Küppers 47, 48.
Kupffer 7.
Lamont 8, 19, 28.
Lang 71—74.
Laplace 5, 33, 36.
Lasaulx 42.
Láska 85, 86.
Lehmann 80.
Leibniz 2, 29.
Leslie 18, 28.
Lichtenberg 3, 28, 52.
Liebenow 50.
Lippschitz 33.
Löffelholz 82.
Lyell 21, 28.
Magnus 6, 39.
Mallet 65—71.
Mandelsloh 16.
Maskelyne 6, 32.
Mattenei 16.
Mendenhall 30, 32.
Middendorff 10.
Millar 74.
Mohr 46.
Moldenhauer 52—55.
Naumann 9, 20, 21, 28, 29.
Newcomb 85.
Newton 2, 6, 29.
Nies 75, 76.
Omodei 76.
Oppenheim 58.
Parrot 11.
Perry 61.
Pfaff 45, 47, 83.
Pilar 9.
Pilla 16.
Plana 33.
Plato 1.
Playfaire 32.
Poggendorff 9.
Poisson 8, 28.
Poynting 31, 32.
Prestwich 44.
Radau 33, 34.
Reich 7, 32.
Reyer 83.
Richarz 31, 32.
Richthofen 3.
Rinne 85.
Ritter 56, 57, 64.
De la Rive 9, 21, 28.
Roche 83.
Roth 39, 69—71.
Rudzki 62, 63, 85.
Schiaparelli 65, 84.
Schmidt, J. C. E. 5, 29.
Scrope 26, 29, 69.
Shaler 83.
Siemens 75.
Soddy 63.
Stapff 35.
Steinhäuser 3.
Sterneck 30, 32.
Stieltjies 33.
Studer 22.
Stübel 78.
Suckow 14.
Symmes 3.
Tammann 77, 80.
Thomson 22—26, 28, 29, 61.
Tisserand 33.
Toula 27, 55, 82.
Treubert 47, 48.
Tumlirz 35.
Vincenti 76.
Volger 46.
Wadsworth 76.
Walferdin 6.
Whitley 74, 75.
Wiechert 35, 36, 85.
Wild 3.
Wilsing 31, 32.
Winkelmann 75.
Woodward 82.
Zach 3.
Zirkel 74.
Zöppritz 57—59, 65.

Druck von Ant. Kämpfe in Jena.

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

14 DAY USE
RETURN TO DESK FROM WHICH BORROWED
EARTH SCIENCES LIBRARY

This book is due on the last date stamped below, or
on the date to which renewed.
Renewed books are subject to immediate recall.

LD 21—40m-10,'65
(F7763s10)476

General Library
University of California
Berkeley

Digitized by Google

390

Storage

Digitized by Google

Digitized by Google